



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**ZVYŠOVÁNÍ PRACOVNÍHO KMITOČTU TIŠTĚNÝCH  
ANTÉN**

INCREASE OF OPERATION FREQUENCY OF PRINTED ANTENNAS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Vojtěch Havlík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**BRNO 2017**

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Elektronika a sdělovací technika

Ústav radioelektroniky

**Student:** Vojtěch Havlík

**ID:** 164728

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

### Zvyšování pracovního kmitočtu tištěných antén

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s konceptem štěrbinové antény na vlnovodu integrovaném do textilního substrátu [2]. Funkčnost konceptu ověřte počítačovou simulací. Podle ověřeného konceptu navrhnete antény pro ISM kmitočty 5,80 GHz a 24,125 GHz.

Navržené antény vyrobte. Stěny vlnovodu integrovaného do textilu vytvořte vyšíváním vodivou nití. Vlastnosti antén navržených pro obě kmitočtová pásma porovnejte z hlediska impedančních vlastností, směrových vlastností a účinnosti.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, C.A. Antenna Theory, Analysis and Design, 3/E, Hoboken: J. Wiley and Sons, 2005.

[2] HUBÁLEK, J., LÁČÍK, J., PUSKELY, J., PRÁŠEK, J., RAID, Z., VAŠINA, P. Wearable antennas: comparison of different concepts, In Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation, Davos (Switzerland): European Association on Antennas and Propagation, 2015.

**Termín zadání:** 6. 2. 2017

**Termín odevzdání:** 30.5.2017

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**Konzultant:**

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.  
předseda oborové rady



#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem vlnovodové štěrbínové antény integrované do textilního substrátu. V této práci byly navrženy antény pracující v ISM pásmech 5,8 GHz a 24,125 GHz. Funkčnost antén byla ověřena simulací v programu CST Microwave Studio. Anténa pro pásmo 5,8 GHz je složena z vlnovodu integrovaného do textilu a koplanárního vlnovodu, který přizpůsobuje charakteristickou impedanci antény k  $50\ \Omega$  koaxiálnímu konektoru. Anténa pro pásmo 24,125 GHz je buzena proudovou sondou. Jako substrát je u obou antén použit 3D textil.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vlnovod integrovaný do textilu, štěrbínová anténa, zemnicí koplanární vlnovod, koaxiální sonda

## ABSTRACT

The thesis is focused on the design of a slot antenna integrated into a textile substrate. In the thesis, antennas operating at the frequency 5.8 GHz and 24.125 GHz (ISM bands) were designed. Functionality of the antennas was verified by simulation performed in the program CST Microwave Studio. The antennas consist of a textile integrated waveguide and a coplanar waveguide which adapts the waveguide characteristic impedance to  $50\ \Omega$  of the input coaxial connector. As a substrate, we used a 3D textile material.

## KEYWORDS

Textile integrated waveguide, slot antenna, grounded coplanar waveguide, coaxial probe

HAVLÍK, V. *Zvyšování pracovního kmitočtu tištěných antén*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 16 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Zvyšování pracovního kmitočtu tištěných antén jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Miroslavu Cupalovi za ochotu a cenné rady při výrobě antén a Ing. Tomáši Mikuláškově Ph.D. za pomoc při měření.

Děkuji Ústavu mikroelektroniky za pomoc při výrobě struktury pomocí sítotiskové metody.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Abstrakt</b>	<b>i</b>
<b>Klíčová slova</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Keywords</b>	<b>i</b>
<b>Prohlášení</b>	<b>iii</b>
<b>Poděkování</b>	<b>iii</b>
<b>Obsah</b>	<b>iv</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Vlnovod integrovaný do substrátu</b>	<b>2</b>
1.1 Vlnovod a jeho vlastnosti .....	2
1.2 Struktura SIW .....	2
1.3 Výpočet struktury SIW .....	3
1.4 Možnosti napájení SIW .....	4
1.4.1 Přechod SIW-zemněný koplanární vlnovod GCPW .....	4
1.4.2 Přechod koaxiálního vedení na SIW .....	4
<b>2 Štěrbínová anténa</b>	<b>6</b>
2.1 Princip štěrbinové antény.....	6
<b>3 Štěrbínová anténa 5,8 GHz</b>	<b>8</b>
3.1 Substrát a vodivá nit .....	8
3.2 Návrh TIW pro 5,8 GHz .....	8
3.3 Návrh zemněného koplanárního vlnovodu .....	10
3.4 Návrh štěrbinové antény 5,8 GHz.....	12
3.5 Srovnání simulovaných a naměřených výsledků.....	13
<b>4 Anténní struktury pro 24,125 GHz</b>	<b>18</b>
4.1 Štěrbínová anténa pro 24,125 GHz.....	18
4.2 Návrh štěrbinové antény 24,125 GHz buzené GCPW .....	20

4.3	Přechod proudové sondy a vlnovodu.....	22
4.4	Návrh štěrbinové antény 24,125 GHz buzené proudovou sondou .....	23
4.5	Srovnání simulovaných a naměřených výsledků antény .....	25
<b>5</b>	<b>Parametrická analýza</b>	<b>27</b>
5.1	Změna vzdálenosti štěrbin od konce vlnovodu.....	27
5.2	Změna vnitřního průměru štěrbin .....	28
5.3	Změna šířky štěrbin .....	29
5.4	Změna velikosti zemní plochy .....	30
5.5	Změna vzdálenosti umístění SMA konektoru .....	31
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>32</b>
	<b>Literatura</b>	<b>33</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>34</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Strukturavlnovodu SIW .....	3
Obrázek 1.2 Přechod koplanárního vedení na SIW .....	4
Obrázek 1.3 Umístění proudové sondy ve vlnovodu .....	5
Obrázek 2.1 Ukázka šterbinové antény .....	6
Obrázek 3.1 Použitá 3D textilie .....	8
Obrázek 3.2 Frekvenční závislost činitele přenosu $S_{21}$ vlnovodu .....	10
Obrázek 3.3 Výpočet GCPW .....	11
Obrázek 3.4 Model GCPW .....	11
Obrázek 3.5 Model anténního prvku .....	12
Obrázek 3.6 Směrové charakteristiky anténního prvku .....	13
Obrázek 3.7 Frekvenční závislost činitele odrazu $S_{11}$ na vstupu anténního prvku .....	13
Obrázek 3.8 Model antény .....	14
Obrázek 3.9 Frekvenční závislost činitele odrazu na vstupu antény .....	15
Obrázek 3.10 Směrové charakteristiky antény .....	15
Obrázek 3.11 Srovnání naměřených a simulovaných hodnot činitele odrazu na vstupu antény 5,45 GHz .....	16
Obrázek 3.12 Srovnání směrových charakteristik antén 5,45 GHz - rovina E .....	16
Obrázek 3.13 Srovnání směrových charakteristik antén 5,45 - rovina H .....	17
Obrázek 3.14 Vyrobené antény 5,8 GHz - sítotiskem (vlevo), měděnou folií (vpravo) .....	17
Obrázek 3.15 Detail šterbiny GCPW antény vyrobené sítotiskem .....	17
Obrázek 4.1 3D vyzařovací charakteristika antény na 24,125 GHz .....	19
Obrázek 4.2 Frekvenční charakteristika činitele odrazu na vstupu antény 24,125 GHz .....	19
Obrázek 4.3 Směrové charakteristiky antény 24,125 GHz .....	20
Obrázek 4.4 3D vyzařovací charakteristika antény buzené GCPW .....	21
Obrázek 4.5 Frekvenční charakteristika činitele odrazu na vstupu antény s GCPW 24,125 GHz .....	21
Obrázek 4.6 Směrové charakteristiky antény 24,125 GHz buzené GCPW .....	22
Obrázek 4.7 Model přechodu SMA konektoru a vlnovodu .....	22
Obrázek 4.8 Frekvenční závislost činitele přenosu $S_{21}$ přechodu SMA-vlnovod .....	23
Obrázek 4.9 Model antény buzené proudovou sondou - pohled shora .....	24
Obrázek 4.10 Model antény buzené proudovou sondou - pohled zespoda .....	24
Obrázek 4.11 Činitel odrazu na vstupu antény buzené proudovou sondou .....	25
Obrázek 4.12 Směrové charakteristiky antény buzené proudovou sondou - rovina E ...	26



Obrázek 4.13 Směrové charakteristiky antény buzené proudovou sondou - rovina H...	26
Obrázek 4.14 Vyrobená anténa na 24,125 GHz .....	26
Obrázek 5.1 Změna vzdálenosti šterbiny od konce vlnovodu - analýza S11 5,8 GHz...	27
Obrázek 5.2 Změna vzdálenost šterbiny od konce vlnovodu - analýza S11 24,125 GHz .....	28
Obrázek 5.3 Změna vnitřního průměru šterbiny - analýza S11 5,8 GHz .....	28
Obrázek 5.4 Změna vnitřního průměru šterbiny - analýza S11 24,125 GHz .....	29
Obrázek 5.5 Změna šířky šterbiny - analýza S11 .....	29
Obrázek 5.6 Změna velikosti zemní plochy - analýza S11 .....	30
Obrázek 5.7 Změna velikosti zemní plochy - analýza rovina H .....	30
Obrázek 5.8 Změna velikosti zemní plochy - analýza rovina E .....	31
Obrázek 5.9 Změna vzdálenosti umístění SMA konektoru .....	31

# ÚVOD

Stále větší počet elektronických zařízení je bezdrátově připojen k internetu. Použité komunikační moduly musejí vykazovat co nejmenší ztráty přenosové energie, co nejnižší výrobní náklady a co nejmenší rozměry (včetně antén). V automobilovém průmyslu by bylo výhodné snažit se zabudovat antény do čalounění dopravních prostředků. Tím odpadne množství kabelových vodičů a sníží se váha vozidel. Dlouhodobým cílem je navrhnout anténu, která bude integrována do textilu a bude pracovat v ISM pásmu 60 GHz.

V této bakalářské práci se zabývám návrhem štěrbínové antény, která je buzena vlnovodem integrovaným do 3D textilu (TIW, *textile integrated waveguide*). Struktura 3D textilie je totiž velmi podobná struktuře čalounění. Přejít mezi koaxiálním konektorem a TIW je realizován dvěma způsoby. Pro anténu pracující v pásmu 5,8 GHz je použit zemněný koplánární vlnovod (GCPW, *grounded coplanar waveguide*). GCPW na rozdíl od mikropáskového vedení vykazuje menší vyzařovací ztráty a lepší impedanční přizpůsobení. Anténa pracující v pásmu 24,125 GHz je buzena proudovou sondou.

Nejprve byla navržena štěrbínová anténa pracující v ISM pásmu 5,8 GHz, poté druhá antény pracující v ISM pásmu 24,125 GHz. Funkčnosti antén byly ověřeny simulací v programu CST Microwave Studio. Stěny TIW byly nahrazeny dokonale vodivou stěnou. Na vrchní stěně TIW byla vytvořena kruhová štěrbínová anténa.

Úvod práce je věnován popisu štěrbínové antény a struktury SIW, z kterého TIW vychází. Dále je popsán samotný návrh antén a srovnání simulovaných výsledků s výsledky naměřenými. V poslední části je prezentována parametrická analýza antén.

# 1 VLNOVOD INTEGROVANÝ DO SUBSTRÁTU

Protože cílem této práce je navrhnout šterbinovou anténu, která je buzena TIW, jsou v této kapitole popsány základní vlastnosti vlnovodu integrovaného do substrátu (SIW, *substrate integrated waveguide*), z něhož TIW vychází. Dále je zde popsán přechod pomocí zemněného koplanárního vlnovodu a buzení vlnovodu koaxiální sondou.

## 1.1 Vlnovod a jeho vlastnosti

Z každodenního života známe řadu různých druhů vedení (např. koaxiální vedení, dvojvodičové vedení, apod.). Tyto druhy vedení jsou ale použitelné jen na nižších mikrovlnných kmitočtech, jelikož s rostoucím kmitočtem přenášeného signálu se zvyšují ztráty v dielektriku těchto vedení [1]. Proto se na vyšších kmitočtech používají vlnovody.

Slovem vlnovod označujeme vedení, které sestává z (téměř) dokonale vodivého válce vyplněného vzduchem. Na vyšších frekvencích vlnovody vykazují malé ztráty a jsou schopny přenášet vysoké výkony. Šířka vlnovodu je v relaci k délce vlny, a proto se tento typ vedení nevyužívá na nízkých kmitočtech.

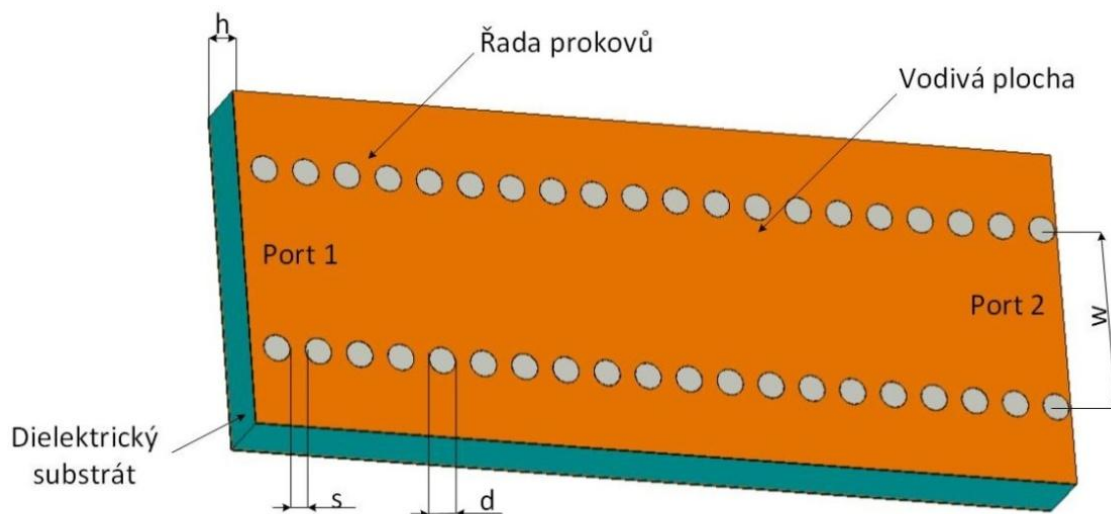
Důležitým parametrem vlnovodu je mezní frekvence. To je minimální frekvence, od které se vlnovodem šíří elektromagnetická vlna.

## 1.2 Struktura SIW

Výroba klasických kovových vlnovodů je velmi nákladná. Proto se snažíme přejít k vlnovodům integrovaným do substrátu (SIW, *substrate integrated waveguide*). SIW má následující výhody:

- Můžeme ho vyrábět levnou technologií plošných spojů (včetně prokovů).
- Na SIW lze snadno navázat další planární obvody, čímž klesne velikost i hmotnost zařízení.
- SIW si zachovává výhody konvenčního vlnovodu (nízké ztráty).

Základem SIW je dielektrický substrát o tloušťce  $h$ , který představuje vnitřní prostor kovového vlnovodu. Tento substrát je z horní i dolní strany pokoven [2]. Dolní stěna obvykle slouží jako zemní plocha a na horní stěně bývá vyleptán motiv. Boční stěny vlnovodu jsou zde tvořeny dvěma řadami prokovů, které spojují obě vodivé plochy. Vzdálenost jednotlivých prokovů  $s$  od sebe a jejich průměr  $d$  jsou předepsány, aby mezi nimi neunikala energie a tím nedocházelo ke ztrátám. Parametr  $w$  představuje šířku SIW, která je závislá na frekvenci elektromagnetické vlny (viz obr. 1.1).



Obrázek 1.1 Struktura vlnovodu SIW

### 1.3 Výpočet struktury SIW

Vlastnosti vlnovodu SIW jsou velmi podobné klasickému obdélníkovému vlnovodu. V literatuře je možné najít empirické vztahy, které popisují výpočet šířky ekvivalentního vlnovodu obdélníkového průřezu z vlnovodu SIW.

Nejprve je nutné určit šířku vlnovodu SIW tak, aby se vlnovodem šířila transversálně elektrická vlna požadovaného vidu. Poté se určí vzdálenost dvou proků  $s$  a průměr proků  $d$  tak, aby nedocházelo ke ztrátám. V literatuře jsou uvedeny doporučené podmínky [3]:

$$\frac{s}{d} < 2 \quad (1.1)$$

a zároveň :

$$\frac{d}{w} < \frac{1}{8} \quad (1.2)$$

kde  $w$  je šířka vlnovodu SIW,  $d$  je průměr proků a  $s$  je vzdálenost dvou proků.

Pro výpočet šířky ekvivalentního vlnovodu obdélníkového průřezu může být využit vztah 1.3:

$$w_{ef} = w - 1,08 \frac{d^2}{s} + 0,1 \frac{d^2}{w} \quad (1.3)$$

kde  $w_{ef}$  je šířka ekvivalentního obdélníkového vlnovodu,  $w$  je šířka vlnovodu SIW,  $d$  je průměr proků a  $s$  je vzdálenost dvou proků.

Pro ověření mezních frekvencí je možné použít vztah 1.4:

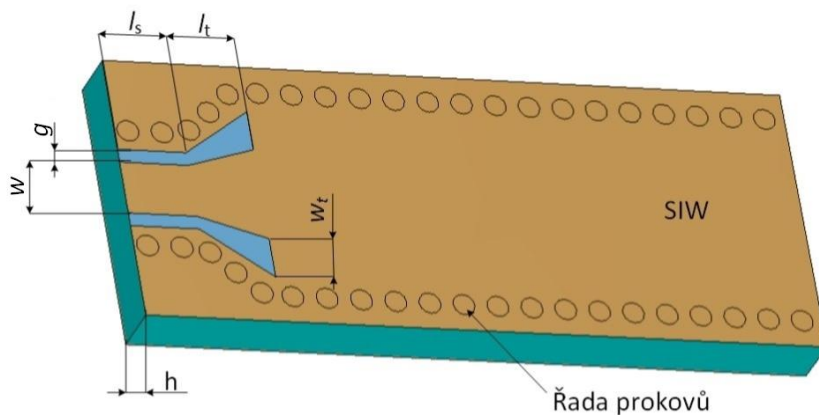
$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.4)$$

kde  $f_m$  je mezní frekvence daného vidu,  $a$  je šířka ekvivalentního vlnovodu,  $b$  je výška vlnovodu,  $m$  a  $n$  jsou vidová čísla elektromagnetické vlny.

## 1.4 Možnosti napájení SIW

### 1.4.1 Přechod SIW-zemněný koplanární vlnovod GCPW

Tento přechod patří mezi základní typy planárních vedení. Vedení je téměř nezávislé na výšce  $h$  dielektrického substrátu. Na rozdíl od mikropáskového vedení se zde může tloušťka substrátu měnit a nebude to mít vliv na velikost přenosových ztrát. Další výhodou jsou menší vyzařovací ztráty než v případě mikropáskového vedení. Spodní strana substrátu je pokovená a slouží jako zemní plocha. Elektromagnetická vlna se šíří podél mikropásku šířky  $w$  umístěného na horní straně substrátu, který je oddělen dvěma trojúhelníkovými štěrbinami šířky  $w_t$  a délky  $l_t$  a štěrbinami šířky  $g$  a délky  $l_s$  od zemní plochy na horní straně substrátu. Jejich délkou je možné nastavit impedanční přizpůsobení přechodu (viz obr. 1.2).

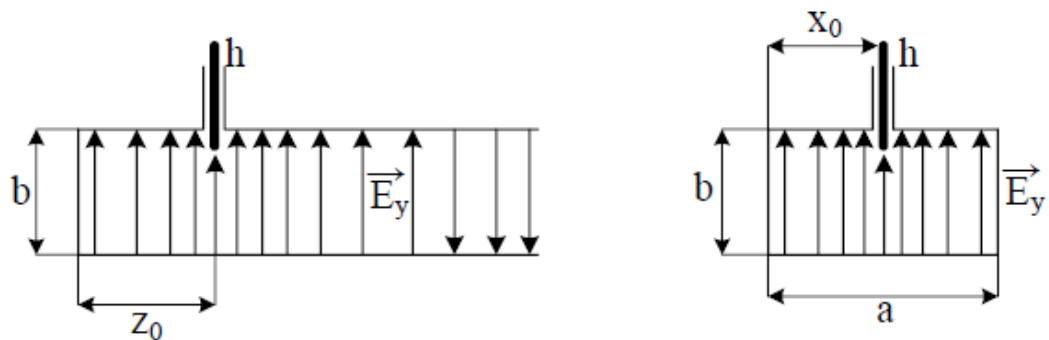


Obrázek 1.2 Přechod koplanárního vedení na SIW

### 1.4.2 Přechod koaxiálního vedení na SIW

Největší výhodou tohoto přechodu je výrazné snížení ztrát, které bývají způsobeny parazitním vyzařováním konektoru. Buzení proudovou sondou je realizováno pomocí vnitřního vodiče koaxiálního vedení s délkou  $h \ll \lambda$  zasunutého do buzeného vlnovodu a vnějšího vodiče koaxiálního vedení spojeného se stěnou vlnovodu. Pro optimální buzení určitého vidu musí být sonda umístěna v maximu elektrického pole vlnovodu, a zároveň musí být zasunuta rovnoběžně se siločarami elektrického pole. Pro vybuzení

dominantního vidu TE<sub>10</sub> ve vlnovodu by měla být sonda zasunuta ve vzdálenosti  $z_0 = \lambda_g/4$  a  $x_0 = a/2$ . Ovšem musí být splněna podmínka, aby budící kmitočet byl vyšší, než je kritický kmitočet samotného vlnovodu [4].



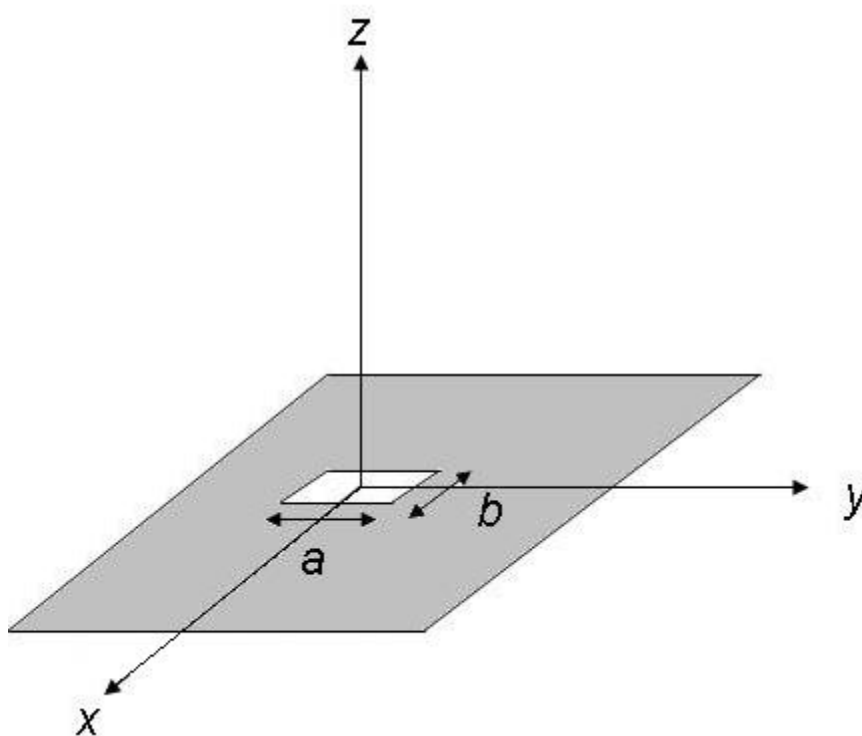
Obrázek 1.3 Umístění proudové sondy ve vlnovodu

## 2 ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNA

V dnešní době se velmi často používají štěrbínové antény. Jejich pracovní frekvence se typicky nachází v rozmezí od 300 MHz do 25 GHz. Štěrbínová anténa je oblíbená z toho důvodu, že může být vytvořena téměř na kterémkoli povrchu. Její struktura se skládá z vodivé plochy, v které je vyříznuta určitá štěrbina. Štěrbínovou anténu lze vytvořit i z vlnovodu, kde se ve stěně vlnovodu vyřízne štěrbina.

### 2.1 Princip štěrbínové antény

Zde je vhodné si vysvětlit princip štěrbínové antény. Ten je založen na Babinetově principu [5]. Jde tedy o nekonečnou plochu, v které je vyříznuta štěrbina o rozměrech  $a$  a  $b$ , jež v literatuře bývá pojmenována jako apertura,. Změnou rozměrů štěrbiny je možno anténu ladit. Štěrbínová anténa má podobné vlastnosti jako dipól. Štěrbina představuje vedení nakrátko, což znamená, že uprostřed štěrbiny se nachází nulový proud a maximální napětí. Zatímco po obvodu štěrbiny prochází maximální proud a nulové napětí, u dipólu je to opačně, protože představuje principiálně vedení naprázdno. Proto má štěrbina vyzařovací diagram v rovinách E a H opačný než dipól.



Obrázek 2.1 Ukázka štěrbínové antény

Z důvodu podobných vlastností dipólu a štěrbínové antény je daný vztah 2.1 mezi impedancemi štěrbiny a dipólu:

$$Z_c Z_S = \frac{\eta}{4}, \quad (2.1)$$

kde  $Z_C$  je impedance dipólu,  $Z_S$  je impedance štěrby a  $\eta$  je charakteristická impedance média, v kterém jsou vytvořeny antény.

Protože platí mezi dipólem a štěrbinovou anténou princip duality, je možné přepočítat ze známého pole dipólu na štěrbinovou anténu a opačně [6]. Níže jsou uvedené vztahy 2.2, 2.3, 2.4, 2.5:

$$E_{\theta S} = H_{\theta C} \quad (2.2)$$

$$E_{\phi S} = H_{\phi C} \quad (2.3)$$

$$H_{\theta S} = \frac{-E_{\theta C}}{\eta^2} \quad (2.4)$$

$$H_{\phi S} = \frac{-E_{\phi C}}{\eta^2} \quad (2.5)$$

kde  $E_{\theta S}$ ,  $E_{\phi S}$ ,  $H_{\theta S}$ ,  $H_{\phi S}$  je vzdálené pole štěrby a  $E_{\theta C}$ ,  $E_{\phi C}$ ,  $H_{\theta C}$ ,  $H_{\phi C}$  je vzdálené pole komplementárního dipólu.



## 3 ŠTĚRBINOVÁ ANTÉNA 5,8 GHZ

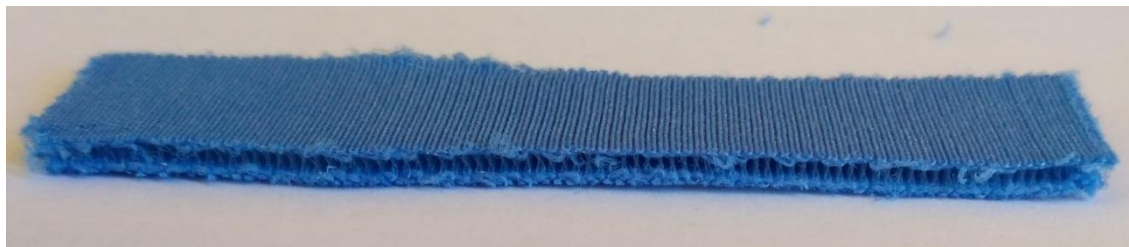
Tato kapitola je věnována návrhu štěrbínové antény pracující v pásmu 5,8 GHz. Nejprve je popsán substrát, z něhož bude anténa vyrobena. Poté je navržen vlnovod integrovaný do textilu (TIW, *textile integrated waveguide*), na jehož horní straně je vytvořen štěrbínový anténní prvek. Dále je zde využit zemněný koplanární vlnovod (GCPW, *grounded coplanar waveguide*), který zajišťuje impedanční přizpůsobení napájecího SMA konektoru a anténního prvku. V závěru kapitoly jsou srovnány výsledky simulace a měření.

### 3.1 Substrát a vodivá nit

Štěrbínová anténa je navržena na 3D textilií, jež nahrazuje dielektrický substrát. Použitá 3D textilie je označena 3D097 a je vyráběna firmou Imbut. Tento materiál je složen ze dvou vnějších tenkých vrstev, mezi nimiž jsou vlákna, která zajišťují konstantní vzdálenost vnějších vrstev. Tím je vytvořen dobrý základ pro konstrukci vlnovodu integrovaného do textilu [7].

Technická dokumentace k textilií 3D097 nebyla výrobcem dodána, a proto byly její parametry změřeny. V této práci je uvažována relativní permitivita substrátu  $\epsilon_r = 1,2$  a výška  $h = 2$  mm.

Boční stěny vlnovodu jsou vyšity vodivou nití Elitex o průměru  $d = 1$  mm a jemnosti 440 dtex.



Obrázek 3.1 Použitá 3D textilie

### 3.2 Návrh TIW pro 5,8 GHz

Začneme stanovením rozměrů vlnovodu. Anténa má být navržena na kmitočet 5,8 GHz. Dominantním videm, který se vlnovodem šíří, je vid  $TE_{10}$ . Šířka vlnovodu pro anténu pracující na kmitočtu 5,8 GHz je  $W = 34$  mm. V další části je tato hodnota ověřena výpočty.

Pro výpočet ekvivalentní šířky vlnovodu bylo nutné dle vztahů pro správnou realizaci struktury TIW určit vzdálenost proků  $s = 1,7 \text{ mm}$  a průměr proků  $d = 1 \text{ mm}$ . Šířku ekvivalentního vlnovodu obdélníkového průřezu je pak možné vypočítat dle vztahu (1.3):

$$w_{ef} = w - 1,08 \frac{d^2}{s} + 0,1 \frac{d^2}{w} = 0,034 - 1,08 \frac{0,001^2}{0,0017} + 0,1 \frac{0,001^2}{0,0017} = 33,4 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Výpočet mezní frekvence pro vid  $TE_{10}$  ze vztahu (1.4) :

$$f_m^{10} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{\left(\frac{1\pi}{0,0334}\right)^2 + \left(\frac{0\pi}{0,002}\right)^2} = 4,1 \text{ GHz}$$

Výpočet mezní frekvence pro vid  $TE_{20}$  ze vztahu (1.4) :

$$f_m^{20} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{0,0334}\right)^2 + \left(\frac{0\pi}{0,002}\right)^2} = 8,2 \text{ GHz}$$

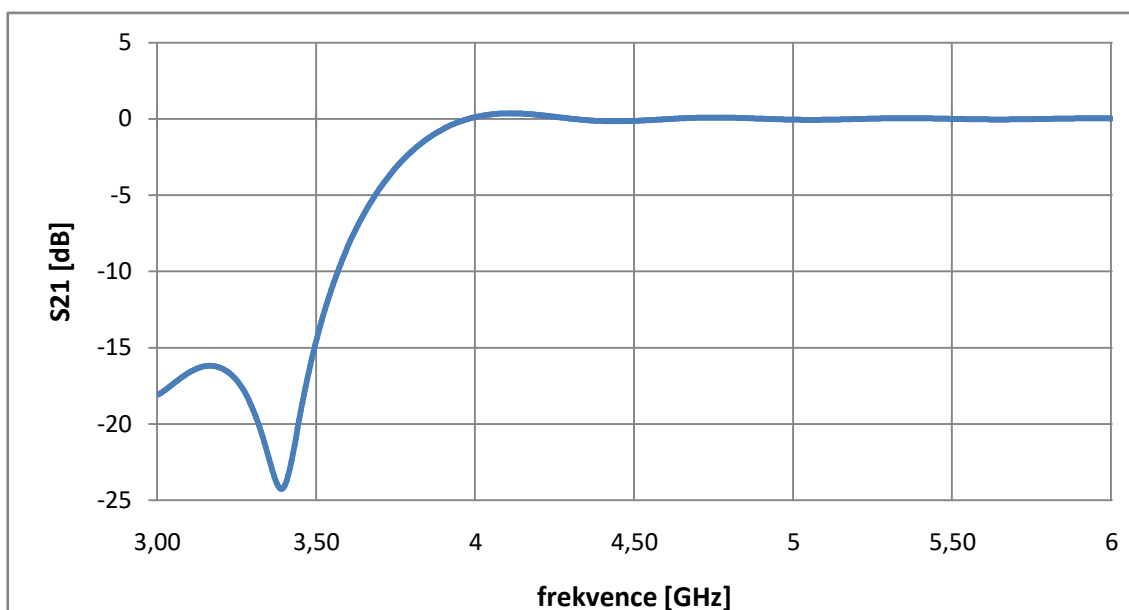
Pro další část návrhu je vhodné vypočítat délku vlny šířící se ve vlnovodu, z které budu vycházet při umístění štěrbiny.

Výpočet délky vlny ve vlnovodu:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{prac}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{prac}}{\lambda_{krit}}\right)^2}} = \frac{\frac{c}{f_{prac} \cdot \sqrt{\epsilon_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{krit}}{f_{prac}}\right)^2}} = \frac{\frac{3 \cdot 10^8}{5,8 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{1,2}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{4,1 \cdot 10^9}{5,8 \cdot 10^9}\right)^2}} = 66,8 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$\lambda_g$  je délka vlny ve vlnovodu,  $c$  je rychlost světla,  $f_{prac}$  je pracovní frekvence,  $\epsilon_r$  relativní permitivita substrátu,  $f_{krit}$  je kritická frekvence vlnovodu

Z vypočítaných mezních frekvencí je patrné, že šířka vlnovodu byla určena správně a vlnovodem se bude šířit elektromagnetická vlna v pásmu jednovidovosti. Vypočítané hodnoty byly ověřené simulací v programu CST. V oblasti za mezním kmitočtem došlo programem CST k nepřesnostem výpočtu, kdy software vypočítal přenos  $S_{21}$  větší než 0 dB, což u pasivních struktur (samotný vlnovod) není možné.

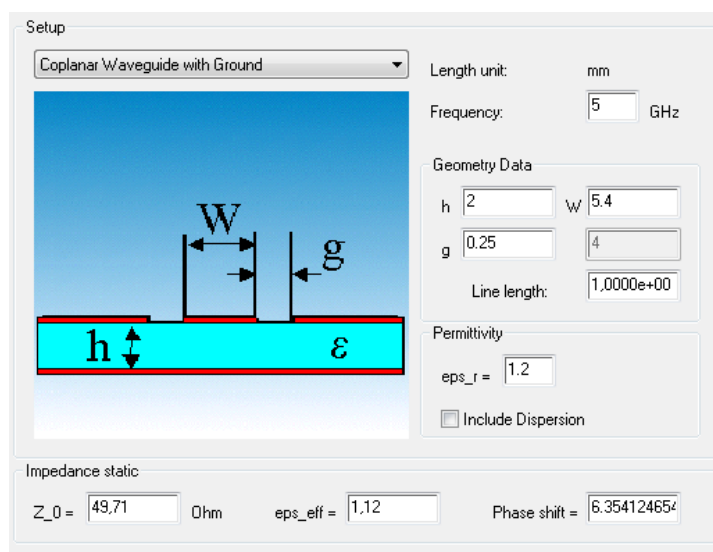


Obrázek 3.2 Frekvenční závislost činitele přenosu S21 vlnovodu

### 3.3 Návrh zemněného koplanárního vlnovodu

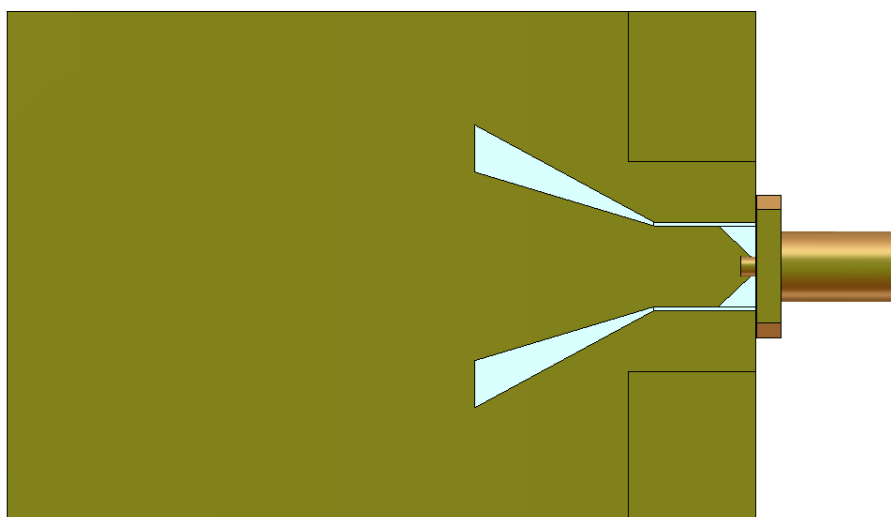
Základní koncept zemněného koplanárního vlnovodu byl převzat z [8]. Tato část je nezbytně nutná pro impedanční přizpůsobení celé antény.

K přizpůsobovací struktuře koplanárního vlnovodu je připojen SMA konektor o charakteristické impedanci  $50\ \Omega$ . Proto prvním krokem návrhu GCPW je výpočet šířky pásku  $w$ , aby vstupní impedance koplanárního vlnovodu byla co nejblíže hodnotě  $50\ \Omega$ , a došlo tak k co nejlepšímu přizpůsobení antény. Analyticky se tento výpočet řeší pomocí integrálních rovnic. Zde je využito kalkulátoru pro výpočet charakteristických impedancí různých vedení, který nabízí program CST Microwave Studio. Hodnoty výšky substrátu, šířky pásku a šířky štěrbin jsou udávány v milimetrech, což je nastaveno v prostředí programu. Šířka štěrbin  $g$  je zvolena s ohledem na výrobní technologie. Výška  $h$  a relativní permitivita  $\epsilon_r$  (v obr. 3.3 představuje  $\epsilon_{ps\_r}$ ) jsou dány parametry dielektrického substrátu. Šířka pásku  $w$  je tedy určena tak, aby se hodnota charakteristické impedance vlnovodu (v obr. 3.3 představuje  $Z_0$ ) co nejvíce blížila charakteristické impedanci SMA konektoru.



Obrázek 3.3 Výpočet GCPW

Model koplanárního vlnovodu je zobrazen na obr. 3.4 Model GCPW. V této části návrhu je zkoumán činitel přenosu  $S_{21}$ . Z tohoto důvodu je na konci vlnovodu v levé části umístěn vlnovodový port. Pásek koplanárního vlnovodu, který je spojen se středním vodičem SMA konektoru, je seříznut, aby nedošlo ke zkratu s vnějším vodičem SMA konektoru. Délka pahýlu byla pro první iteraci zvolena jako čtvrtina vlnové délky ve vlnovodu, následně byla optimalizována pro nejlepší hodnoty  $S$ -parametrů.

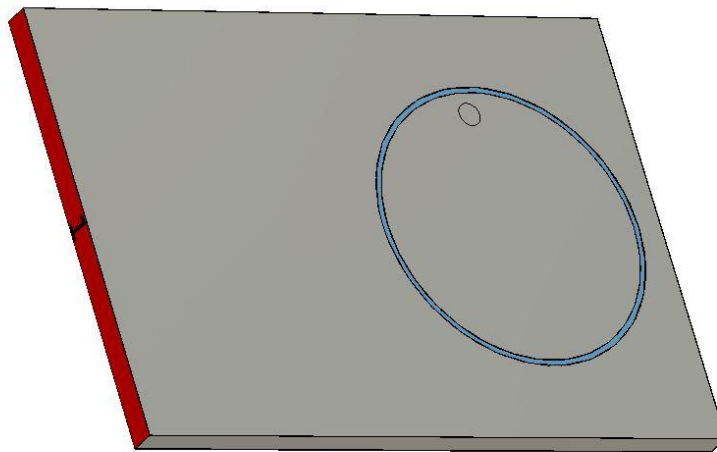


Obrázek 3.4 Model GCPW

V celém zkoumaném rozsahu je koplanární vlnovod impedančně přizpůsoben; na pracovním kmitočtu 5,8 GHz byla změřena hodnota činitele odrazu  $S_{11} = -13,2$  dB. Dochází zde ke ztrátám, které jsou způsobeny pahýly umístěnými na horní stěně vlnovodu. Na kmitočtu 5,8 GHz byla změřena hodnota činitele přenosu  $S_{21} = -0,43$  dB.

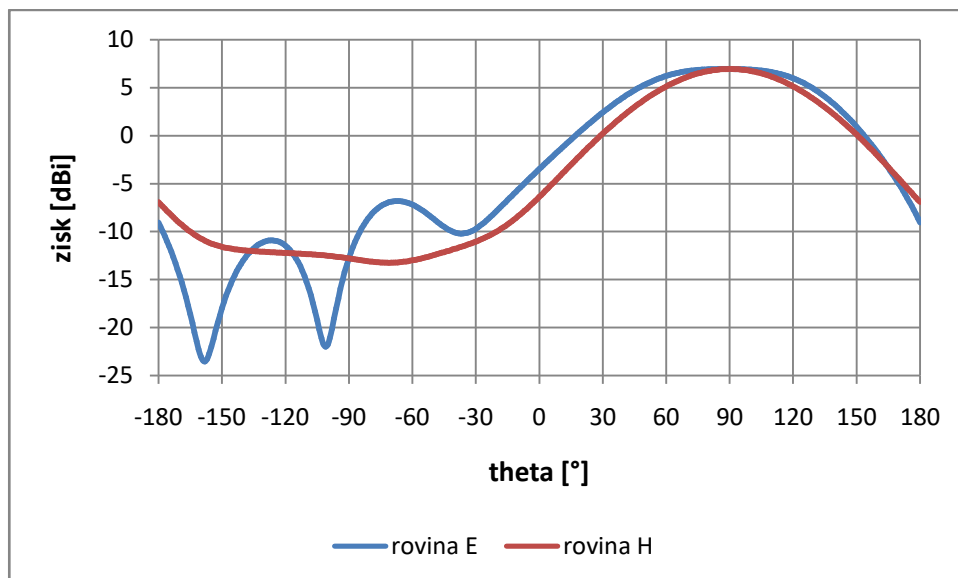
### 3.4 Návrh štěrbinové antény 5,8 GHz

Základní koncept štěrbinové antény byl převzat z [9], kde byla tato anténa navržena na frekvenci 8 GHz. Nejdůležitějším prvkem antény je kruhová štěrbina, která způsobuje primární vyzařování elektromagnetické vlny. Umístění štěrbin v horní stěně vlnovodu je tedy zásadní pro celý návrh. Pro maximální zisk antény by se měl střed kruhové štěrbiny nacházet  $\lambda_g/4$  od konce zkratovaného vlnovodu, tedy v maximu intenzity elektrického pole. Průměrem štěrbiny je možno anténu vyladit na požadovanou frekvenci. Šířka štěrbiny mění kvalitu impedančního přizpůsobení. V simulaci byl anténní prvek buzen vlnovodovým portem, což je vidět na obrázku níže. Boční stěny vlnovodu byly v simulaci vytvořeny dokonale elektricky vodivou stěnou. Při výrobě budou stěny vlnovodu vyšity vodivou nití.

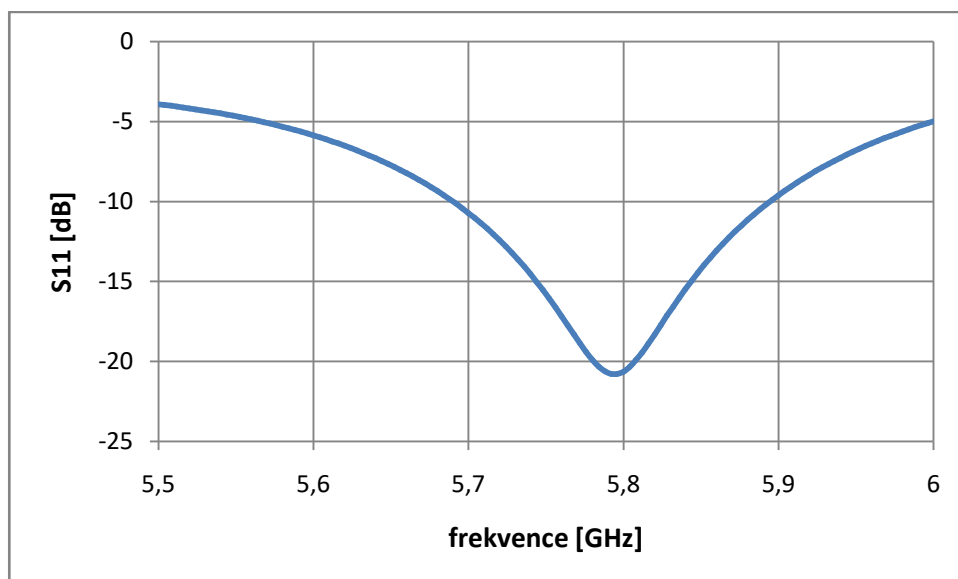


Obrázek 3.5 Model anténního prvku

Směrové charakteristiky (obr. 3.6) ukazují, že směr vyzařování anténního prvku je kolmý, což je v této práci záměr. Zisk prvku je 6,93 dBi. Šířka hlavního laloku v rovině E je přibližně  $88^\circ$  a v rovině H  $90^\circ$ . Je vidět i částečné vyzařování do spodní strany této struktury. To lze omezit velikostí zemní plochy. V ideálním případě by byla potřeba nekonečně velká zemní plocha. To ovšem není realizovatelné, a proto v dalším postupu návrhu je rozšířena zemní plocha o 5 mm. Z frekvenční závislosti činitele odrazu (obr. 3.7) na vstupu S11 je vidět, že anténní prvek je v požadovaném pásmu impedančně přizpůsoben. Šířka pásma impedančního přizpůsobení je od 210 MHz.



Obrázek 3.6 Směrové charakteristiky anténního prvku



Obrázek 3.7 Frekvenční závislost činitele odrazu  $S_{11}$  na vstupu anténního prvku

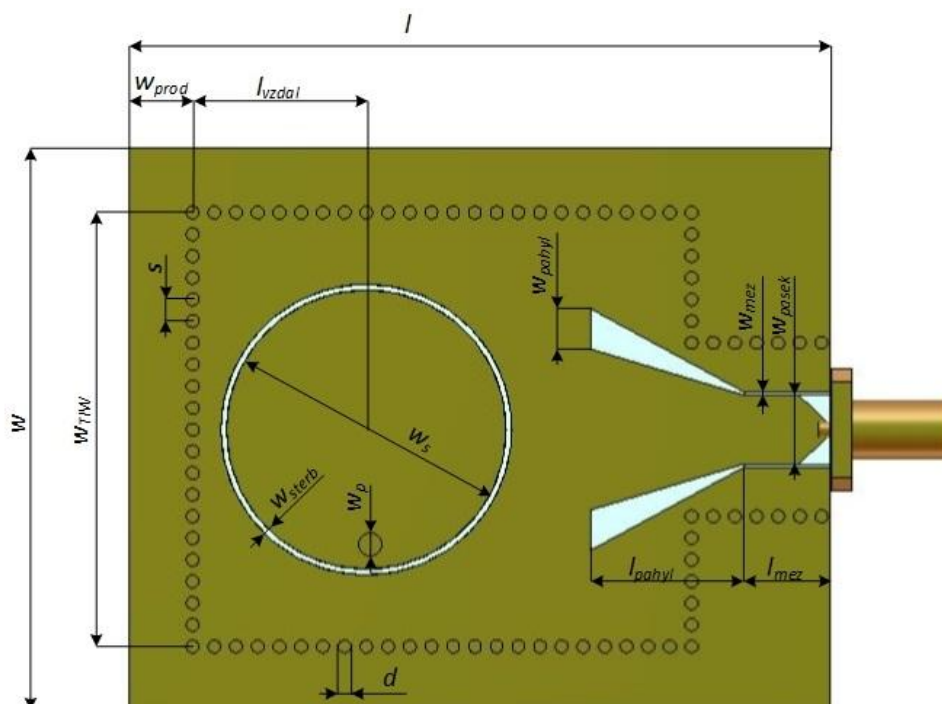
### 3.5 Srovnání simulovaných a naměřených výsledků

V této podkapitole jsou porovnány simulované výsledky z programu CST a naměřené parametry vyrobených antén. Zkoumanými parametry byl činitel odrazu na vstupu  $S_{11}$ , směrové charakteristiky a zisk.

Všechny části štěrbinové antény byly modelovány a simulovány v programu CST. Následně byly spojeny v jeden celek, a celá struktura byla v tomto programu optimalizována. Pro zkrácení doby výpočtu byly stěny tvořeny dokonale elektricky vodivou stěnou tzv. PEC. Na konci optimalizace byly PEC stěny nahrazeny prokovy, aby simulovaný model co nejvíce odpovídal vyrobené anténě. K zajištění přesnosti

výsledků měření a výsledků simulace je zapotřebí v programu CST vhodně nastavit tzv. diskretizační síť. Jde o nastavení počtu buněk, se kterými bude program počítat. S rostoucím počtem buněk jsou výsledky přesnější, ale samozřejmě roste i doba výpočtu při analýze struktury.

Antény byly vyrobeny dvěma technologiemi. První prototyp antény byl vyroben pomocí měděné folie, jejíž tloušťka byla změřena 49 mikrometrů. Tato folie je nalepena na horní a spodní stranu textilu. Druhý prototyp antény byl vyroben sítotiskem. Vodivá pasta obsahující částice stříbra je nanesena na nažehlovací folii, která je na 3D textil nažehlena z obou stran. Boční stěny jsou u obou prototypů vyšity vodivou nití o průměru 1 milimetr. Model antény je zobrazen na obr. 3.8.

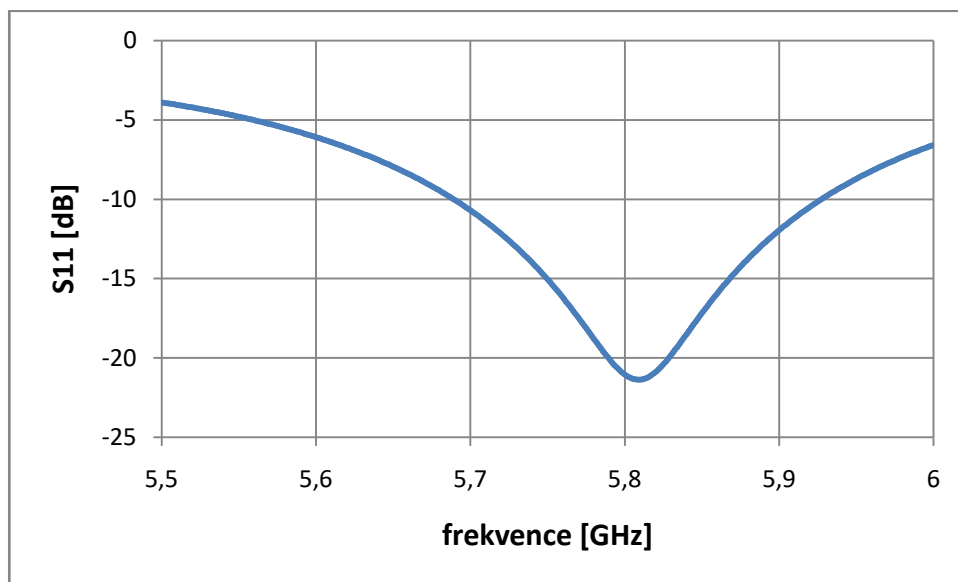


Obrázek 3.8 Model antény

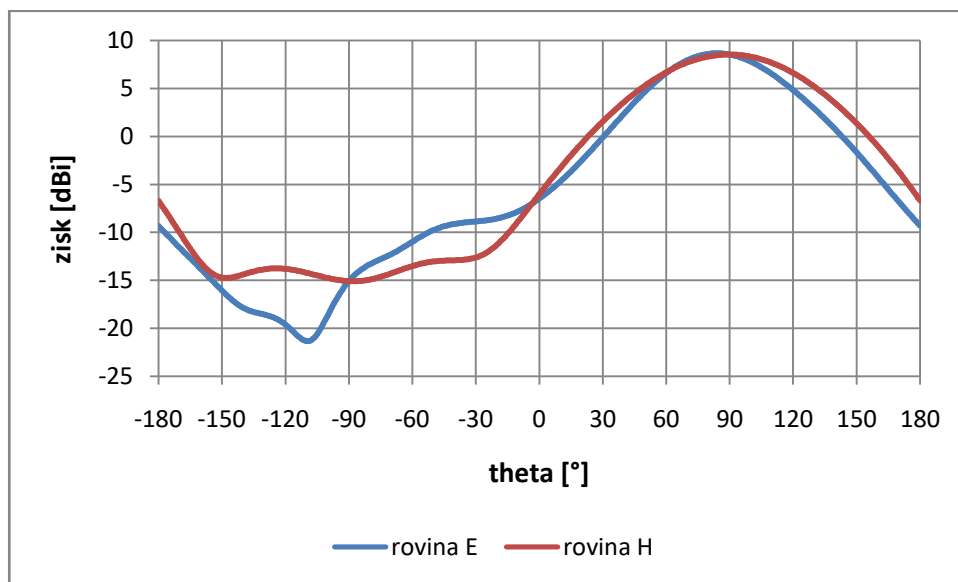
Tabulka 1 Rozměry navržené antény pro pásmo 5,8 GHz

Parametr	Rozměr [mm]	Parametr	Rozměr [mm]
$l$	55	$w_{prod}$	5
$l_{vzdal}$	13,2	$w_{sterb}$	0,55
$l_{pahyl}$	12	$w_p$	1,8
$l_{mez}$	6,8	$w_s$	22,6
$s$	1,7	$w_{pahyl}$	3,15
$d$	1	$w_{mez}$	0,25
$w$	44	$w_{pasek}$	5,4
$w_{TTW}$	34		

Z frekvenční závislosti činitele odrazu (obr. 3.9) antény je možno vyčíst, že anténa je opět kvalitně impedančně přizpůsobena a šířka přizpůsobeného pásma činí přibližně 230 MHz. Podle očekávání je ze směrové charakteristiky antény vidět omezení vyzařování ve směru za spodní stěnou antény. Rovněž bylo dosaženo vyššího zisku, který je nyní 8,65 dBi. Šířka hlavního laloku se v rovině E zmenšila na 84° a v rovině H zůstala beze změny 90°.



Obrázek 3.9 Frekvenční závislost činitele odrazu na vstupu antény

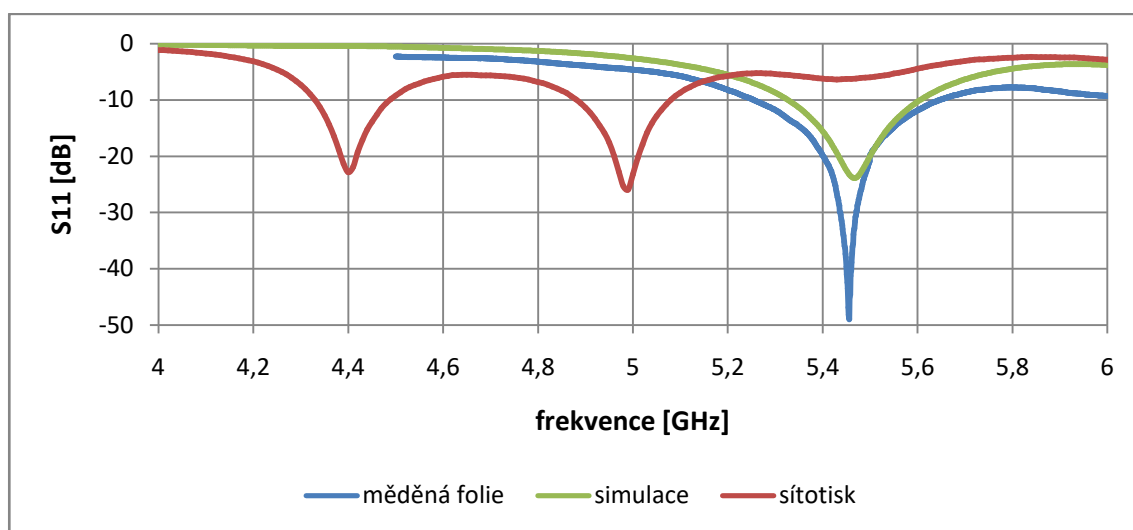


Obrázek 3.10 Směrové charakteristiky antény

Anténa byla navržena pro textil o tloušťce  $h = 2,0$  mm. Po vyrobení měděné folie firma Imbut dodala textil o tloušťce 2,6 mm. Na základě této skutečnosti byla změněna výška textilu v simulaci a její výsledky jsou srovnány s měřeními.

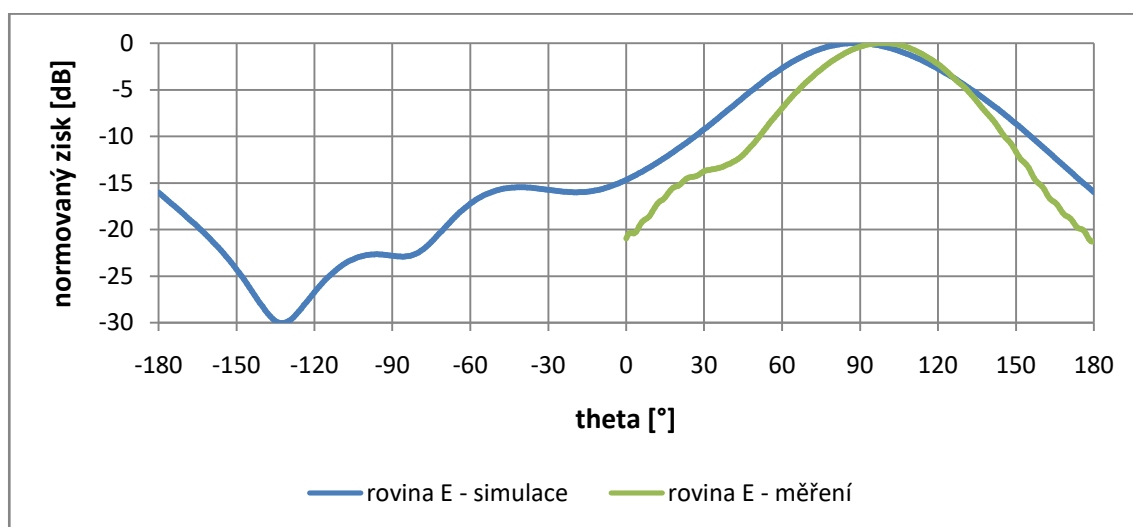


Na obr. 3.11 je možno vidět frekvenční závislost činitele odrazu na vstupu vyrobených a simulované antény. Rezonanční frekvence simulované antény je na kmitočtu 5,47 GHz a dosahuje hodnoty činitele odrazu na vstupu  $S_{11} = -23,9$  dB. Průběh vyrobené antény s měděnou folií se poměrně přesně shoduje s průběhem simulované antény. Došlo k posunu rezonanční frekvence o 15 MHz k nižším frekvencím a vektorovým analyzátozem byla změřena hodnota činitele odrazu na vstupu  $S_{11} = -48,91$  dB. U antény vyrobené sítotiskem byl změřen jen činitel odrazu na vstupu antény, který obsahuje dvě rezonanční frekvence. To je zapříčiněno nedostatečně přesně vyrobenými šterbinami koplanárního vlnovodu, jejíž šířky byly pod mikroskopem naměřeny přibližně 0,1 mm místo požadovaných 0,25 mm. Také došlo ke zmenšení šířky kruhové šterbiny přibližně o 0,2 mm. Detail šterbin GCPW je ukázán na obr 3.15.

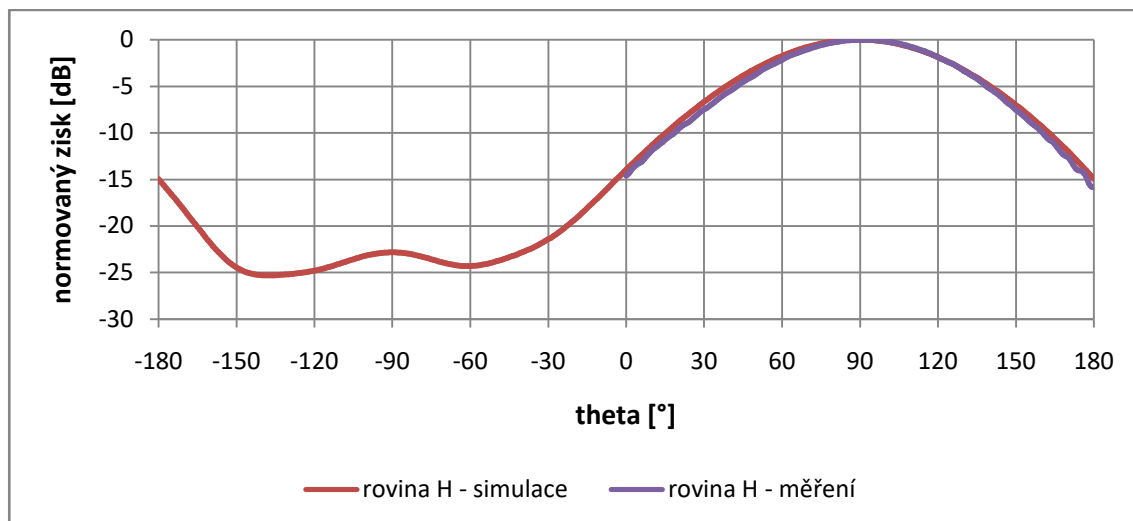


Obrázek 3.11 Srovnání naměřených a simulovaných hodnot činitele odrazu na vstupu antény 5,45 GHz

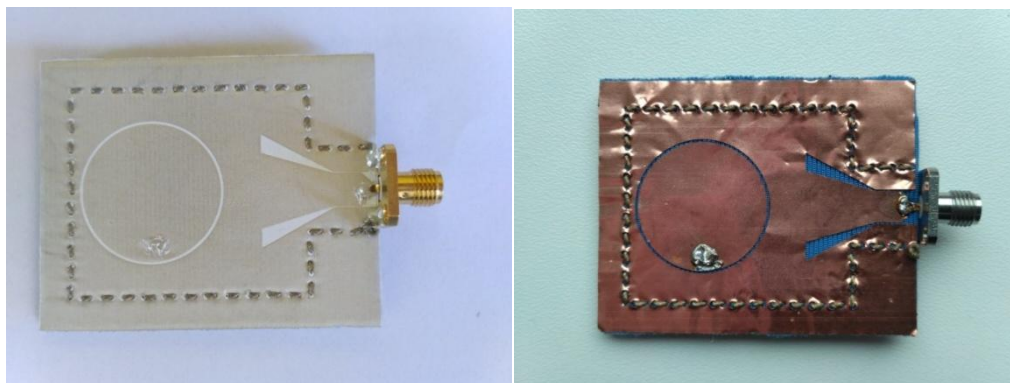
Ze směrových charakteristik antén roviny E (obr. 3.12) je možné pozorovat malé deformace, které jsou nejspíš způsobené vlivem konektoru. V rovině H (obr. 3.13) jsou průběhy měřené a simulované antény téměř identické. Zisk antény byl změřen 8,08 dBi.



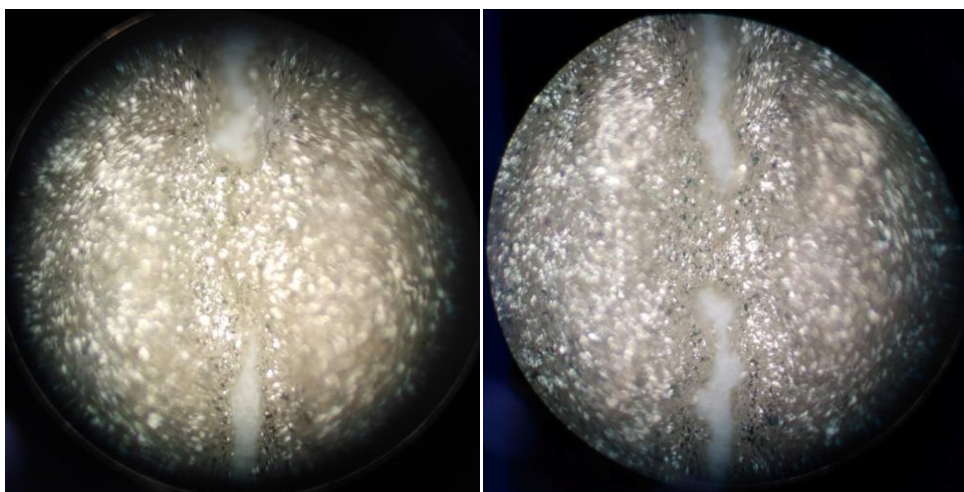
Obrázek 3.12 Srovnání směrových charakteristik antén 5,45 GHz - rovina E



Obrázek 3.13 Srovnání směrových charakteristik antén 5,45 - rovina H



Obrázek 3.14 Vyrobené antény 5,8 GHz - sítotiskem (vlevo), měděnou folií (vpravo)



Obrázek 3.15 Detail štěrbiny GCPW antény vyrobené sítotiskem

## 4 ANTÉNNÍ STRUKTURY PRO 24,125 GHz

Tato kapitola popisuje návrh štěrbínové antény pracující v pásmu 24,125 GHz. Nejprve byla navržena struktura buzená zemněným koplanárním vlnovodem. Z důvodu nevhodného vyzařovacího diagramu bylo použito jiné buzení antény, a to buzení proudovou sondou. Tato struktura byla vyrobena, změřena a výsledky měření byly porovnány s výsledky simulace z hlediska činitele odrazu na vstupu antény, vyzařovacího diagramu a zisku.

### 4.1 Štěrbínová anténa pro 24,125 GHz

Postup návrhu štěrbínové antény pro pásmo 24,125 GHz je stejný jako v kapitole 3.4 Návrh štěrbínové antény 5,8 GHz. Nejprve tedy byla určena příčná šířka TIW vlnovodu  $W = 8,4$  mm, poté byly určeny průměry prokůvů a vzdálenost dvou sousedních prokůvů podle vztahu 1.1 a 1.2.

Šířka ekvivalentního obdélníkového vlnovodu je vypočítána podle vztahu 1.3:

$$w_{ef} = 8 \text{ mm}$$

Mezní frekvence vidu TE<sub>10</sub> a TE<sub>20</sub> jsou vypočítány podle vztahů 1.4 :

$$f_m^{10} = 17,1 \text{ GHz}$$

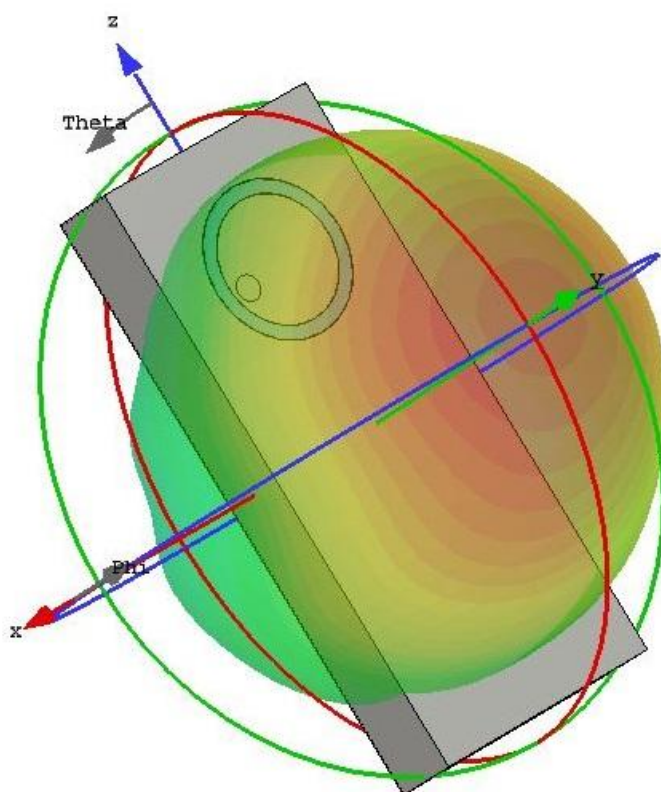
$$f_m^{20} = 34,2 \text{ GHz}$$

Z mezních frekvencí je opět patrné, že se vlnovodem šíří pouze elektromagnetická vlna vidu TE<sub>10</sub> při pracovní frekvenci 24,125 GHz.

Pro určení vzdálenosti štěrbiny od konce zkratovaného vlnovodu je zapotřebí ještě vypočítat délku vlny ve vlnovodu, z které bude určena tato vzdálenost. Výpočet je proveden podle vztahu 3.2 :

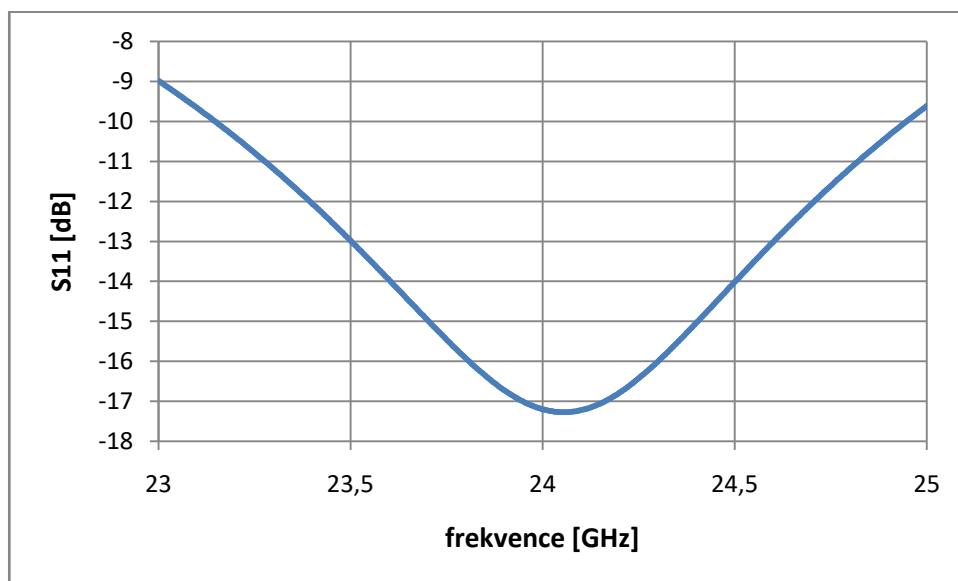
$$\lambda_g = 16,1 \text{ mm}$$

Na obrázku obr. 4.1 je vidět model antény a zároveň jeho 3D vyzařovací charakteristika. Struktura antény se skládá z vlnovodu, v jehož horní stěně je vyříznuta kruhová štěrbina. Střed kruhové štěrbiny byl nejprve umístěn do maxima vybuzeného elektromagnetického pole vlnovodu. Vzdálenost štěrbiny od konce zkratovaného vlnovodu je proto  $\lambda_g/4$ . Tato vzdálenost byla později mírně zkrácena pro lepší impedanční přizpůsobení, které ještě zkvalitňuje prokov umístěný uvnitř štěrbiny. Ten navíc způsobuje větší šířku impedančně přizpůsobeného pásma. Anténa je v simulaci buzena vlnovodovým portem.



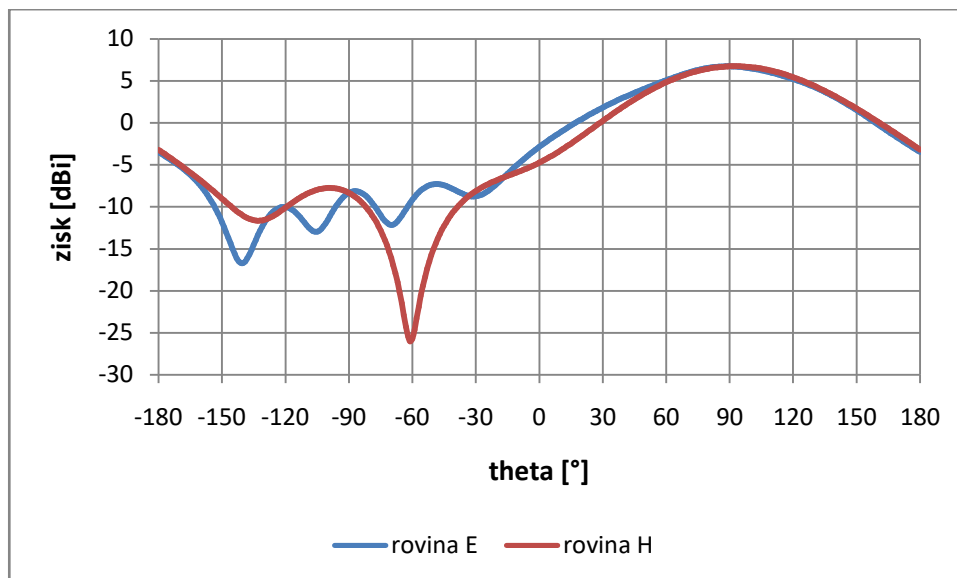
Obrázek 4.1 3D vyzařovací charakteristika antény na 24,125 GHz

Z obr. 4.2 je vidět, že je anténa na požadované frekvenci impedančně přizpůsobena a šířka přizpůsobeného pásma pod hodnotou činitele odrazu na vstupu antény  $S_{11} = -10$  dB činí přibližně 1,7 GHz.



Obrázek 4.2 Frekvenční charakteristika činitele odrazu na vstupu antény 24,125 GHz

Na obr 4.3 jsou zobrazeny směrové charakteristiky antény v rovinách E a H. Směr vyzařování antény je kolmý, přičemž zisk antény činí 6,73 dBi. Zvýšení zisku antény lze docílit rozšířením zemní plochy. Tím také dojde ke zmenšení vyzařování v intervalu theta -180° až 0°.



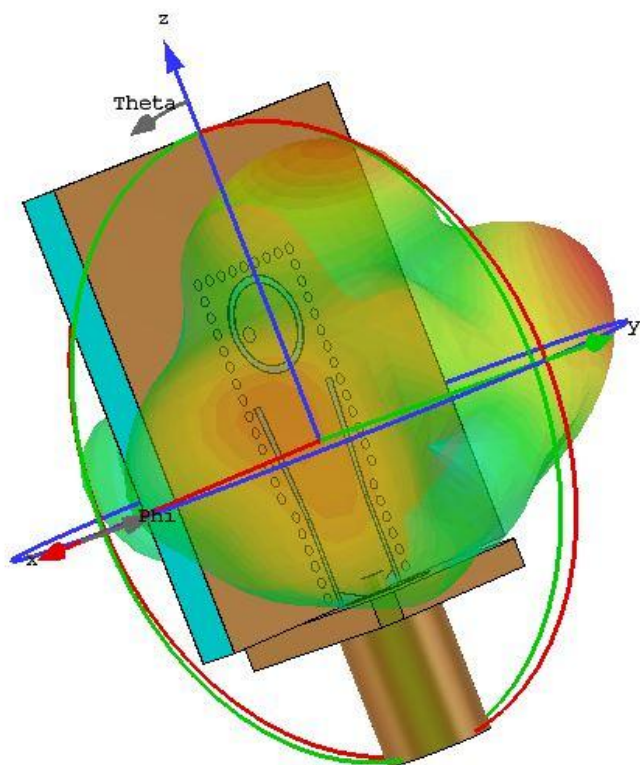
Obrázek 4.3 Směrové charakteristiky antény 24,125 GHz

## 4.2 Návrh šterbinové antény 24,125 GHz buzené GCPW

Struktura antény byla převzata z práce [9], v které je anténa navržena pro pásmo 8 GHz. Místo mikropáskového vedení je zde použit zemněný koplanární vlnovod z důvodu menších vyzařovacích ztrát a lepšího impedančního přizpůsobení.

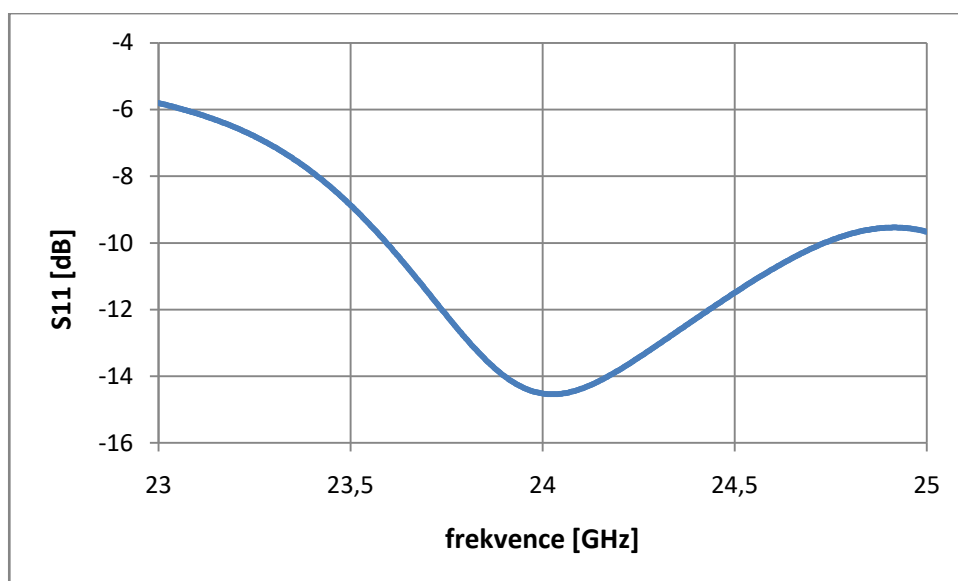
Rozměry struktury byly přepočítány pro ISM pásmo 24,125 GHz. Šířka pásku na vstupu zemněného koplanárního vlnovodu zůstala stejná jako v kapitole 3.3, protože s rostoucí frekvencí se velikost impedance pásku nemění. Došlo pouze ke zkrácení pahýlů, které by měly odpovídat přibližně vzdálenosti  $\lambda_g/4$ .

Celá anténa je tvořena spojením již vytvořené části v kapitole 4.1 Šterbinová anténa 24,125 GHz spolu s GCPW, který zde zajišťuje impedanční přizpůsobení. Pro napájení struktury je v simulaci namodelován SMA konektor. Na takto vysoké frekvenci je tento způsob buzení antény nevhodný z důvodu parazitního vyzařování přechodu SMA konektor - zemněný koplanární vlnovod. Tento fakt je ukázán na obr. 4.4, kde je zobrazena struktura antény s připojeným SMA konektorem. Proto bylo z tohoto způsobu buzení upuštěno a byl zvolen způsob buzení pomocí proudové sondy.

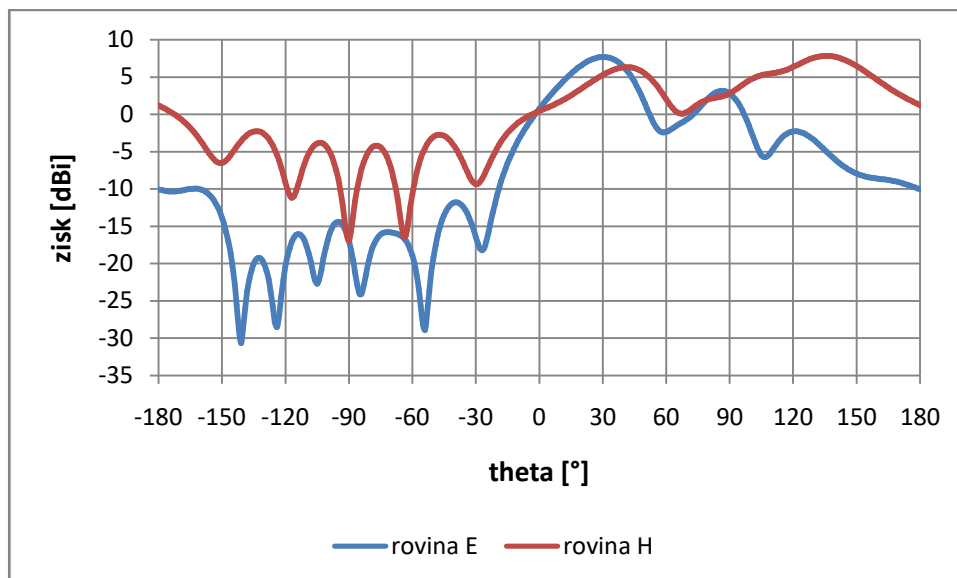


Obrázek 4.4 3D vyzařovací charakteristika antény buzené GCPW

Po připojení SMA konektoru došlo ke zhoršení kvality impedančního přizpůsobení, což je dáno přizpůsobovacím členem koplanárního vlnovodu, který nebyl dostatečně optimalizován. Z obr. 4.5 je možno odečíst hodnotu činitele odrazu na vstup  $S_{11} = -14,3$  dB na kmitočtu  $f = 24,125$  GHz. Šířka přizpůsobeného pásma, v které by anténa mohla pracovat je 1,1 GHz, což je o 0,6 GHz méně než v případě buzení antény vlnovodovým portem. Zisk této antény vzrostl a dosahuje hodnoty 9,42 dBi.



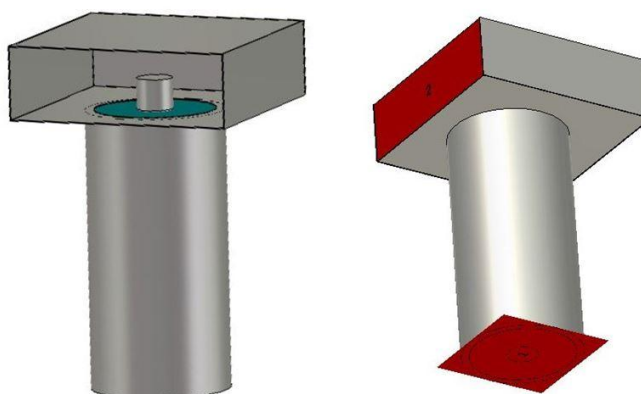
Obrázek 4.5 Frekvenční charakteristika činitele odrazu na vstupu antény s GCPW 24,125 GHz



Obrázek 4.6 Směrové charakteristiky antény 24,125 GHz buzené GCPW

### 4.3 Přejchod proudové sondy a vlnovodu

Pro potlačení parazitního vyzařování přechodu SMA konektoru byl vybrán přechod pomocí vlnovodu, který je buzen proudovou sondou. Popis tohoto přechodu je popsán v kapitole 1.5.2 Přechod koaxiálního vedení na SIW. Při výrobě prototypu bude proudová sonda nahrazena SMA konektorem. V simulaci je nejprve jeden konec vlnovodu zkratován a druhý je zakončen naprázdno z důvodu sledování činitele přenosu struktury  $S_{21}$ , což je možné vidět na obr. 4.7.



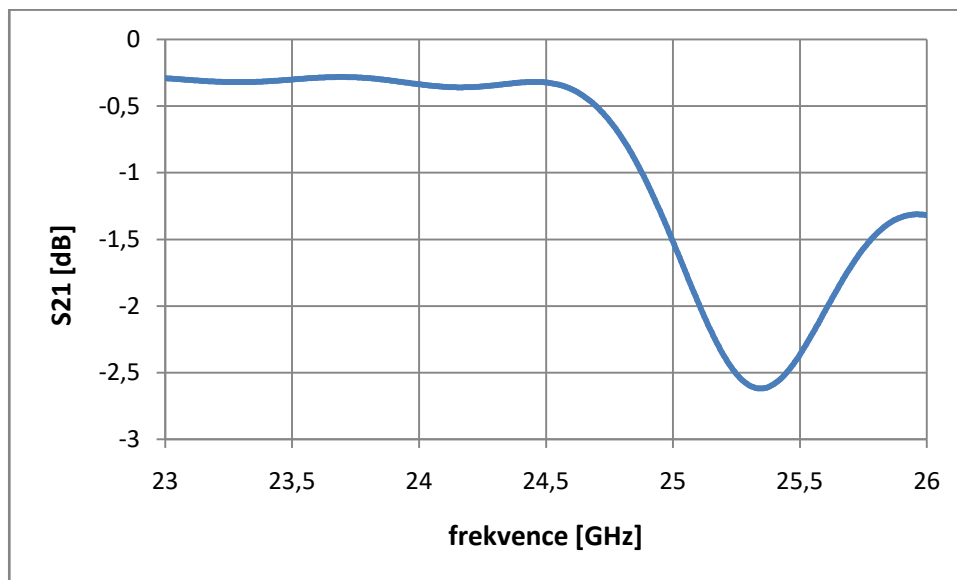
Obrázek 4.7 Model přechodu SMA konektoru a vlnovodu

Pro první iteraci byla proudová sonda umístěna ve vzdálenosti  $\lambda_g/4$  od zkratovaného konce vlnovodu. Sonda byla zároveň umístěna do středu příčné šířky vlnovodu, tedy do maxima intenzity elektromagnetického pole. Ve spodní stěně vlnovodu je vyříznut otvor pro dielektrikum, aby nedošlo ke kontaktu středního vodiče se spodní stěnou vlnovodu a tím ke zkratu s vnějším vodičem. Důležitými parametry



jsou zde hloubka zasunutí středního vodiče a zároveň umístění proudové sondy v podélném směru vlnovodu. Těmito parametry je možné přechod vyladit, aby se jeho přenos  $S_{21}$  ideálně blížil 0 dB, což by znamenalo, že nedochází k žádným ztrátám a veškerá energie je přechodem přenesena.

Z obr. 4.8 je možné pozorovat, že v této části návrhu přechodem dochází ke ztrátě energie a na požadované frekvence 24,125 GHz se rovná činitel přenosu přechodu  $S_{21} = -0,36$  dB. Kvůli nedostatku času už nedošlo ke zlepšení této části návrhu.



Obrázek 4.8 Frekvenční závislost činitele přenosu  $S_{21}$  přechodu SMA-vlnovod

#### 4.4 Návrh štěrbinové antény 24,125 GHz buzené proudovou sondou

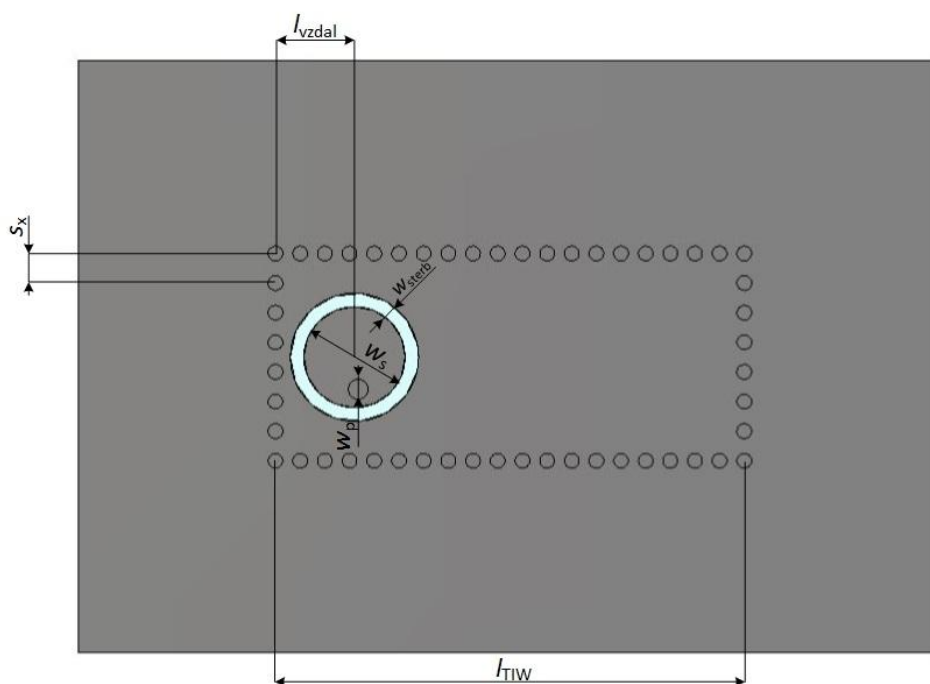
Zde je navržený přechod z kapitoly 4.3 Přechod proudové sondy a vlnovodu spojen s anténním prvkem, který byl navržen v kapitole 4.1 Návrh štěrbinové antény 24,125 GHz.

Anténa byla vyrobena na 3D textilií, která tvoří substrát a je popsána v kapitole 3.1 Substrát a vodivá nit. V této části práce už byla uvažována nová tloušťka textilie a to  $h = 2,6$  mm. Na horní i dolní straně textilie je nalepena měděná folie, boční stěny jsou vyšity vodivou nití o průměru 0,6 mm. Pro tento prototyp byl vybrán SMA konektor R125414000 [10], který je schopen pracovat až do kmitočtu 27 GHz. Proto by měl být postačující v této práci. SMA konektor byl ke spodní stěně vlnovodu přilepen vodivým lepidlem, protože v případě pájení by mohlo dojít k nenávratnému poškození textilie.

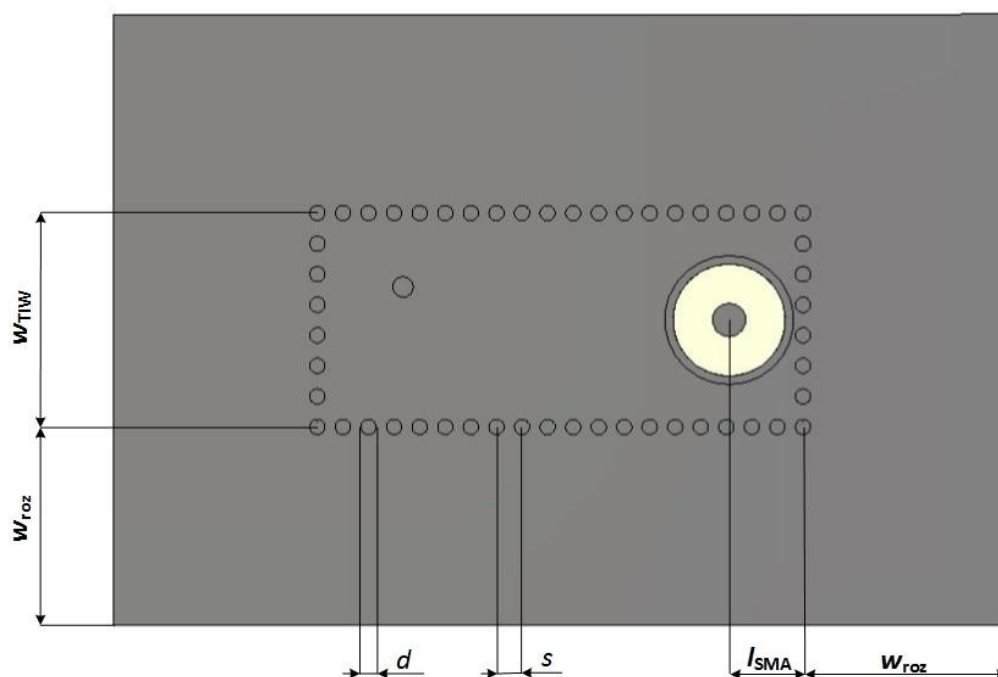
Na konci simulačního procesu opět byly stěny vlnovodu PEC nahrazeny prokovy. Pro přepočítání šířky vlnovodu TIW a šířky vlnovodu obdélníkového průřezu byla použita rovnice 1.3. Vzdálenost dvou prokovů byla v příčném směru mírně zvětšena z důvodu dodržení přesné šířky vlnovodu TIW. V případě nedodržení této šířky by se změnila mezní frekvence TIWu, tím by došlo i ke změně délky vlny ve vlnovodu a k rozladění celé struktury.



Na obr. 4.9 a obr. 4.10 jsou zobrazeny horní resp. spodní pohled na navrženou anténu buzenou proudovou sondou s naznačenými parametry, které jsou uvedené v Tabulka 2.



Obrázek 4.9 Model antény buzené proudovou sondou - pohled shora



Obrázek 4.10 Model antény buzené proudovou sondou - pohled zespoda

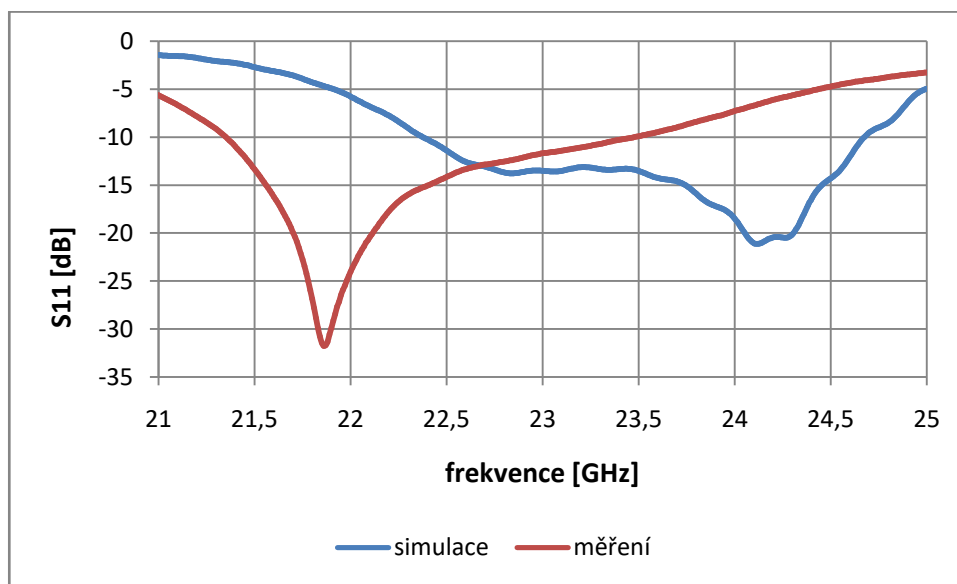
Tabulka 2 Rozměry navržené antény pro pásmo 24,125 GHz

Parametr	Rozměr [mm]	Parametr	Rozměr [mm]
$l_{TIW}$	19	$w_{TIW}$	8,4
$l_{vzdal}$	3,2	$w_{sterb}$	0,55
$l_{SMA}$	2,7	$w_p$	0,8
$s$	1	$w_s$	4,1
$s_x$	1,2	$w_{roz}$	8
$d$	0,6		

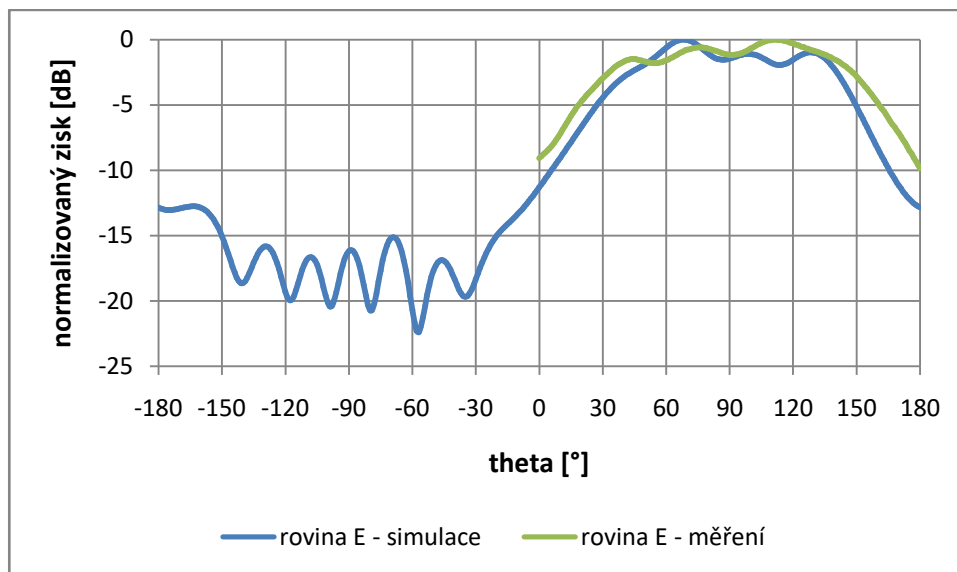
## 4.5 Srovnání simulovaných a naměřených výsledků antény

Pro anténu buzenou proudovou sondou byla vytvořena simulace v programu CST, jejíž výsledky jsou porovnány s naměřenými hodnotami. Zkoumanými parametry byly činitel odrazu na vstupu antény, směrová charakteristika a zisk antény.

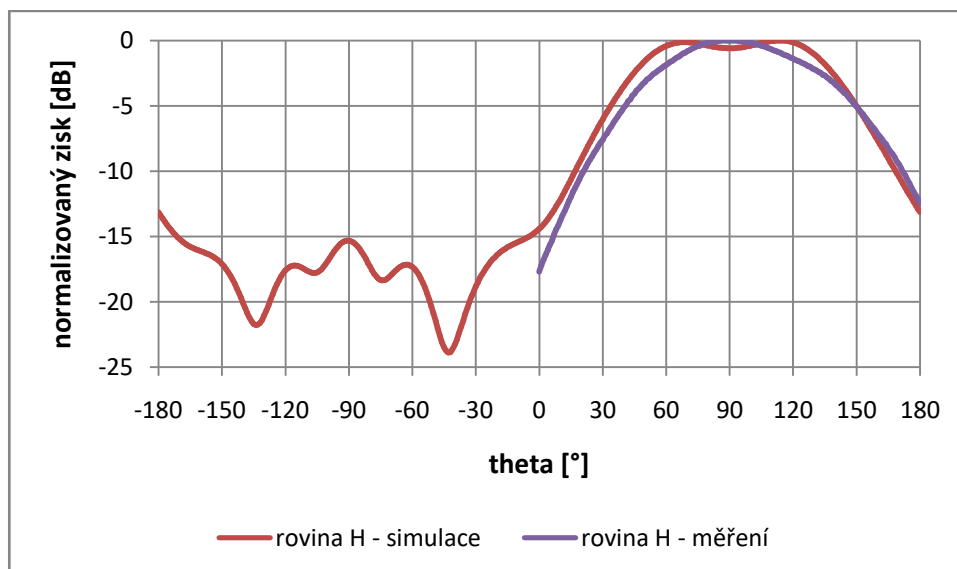
Rezonanční frekvence vyrobené antény je vůči simulovanému modelu posunuta o 2,225 GHz a na tomto kmitočtu je činitel odrazu na vstupu antény roven  $S_{11} = -31,77$  dB. Tento posun může být způsoben nepřesně umístěným SMA konektorem. Zisk antény je roven 7,368 dBi.



Obrázek 4.11 Činitel odrazu na vstupu antény buzené proudovou sondou



Obrázek 4.12 Směrové charakteristiky antény buzené proudovou sondou - rovina E



Obrázek 4.13 Směrové charakteristiky antény buzené proudovou sondou - rovina H



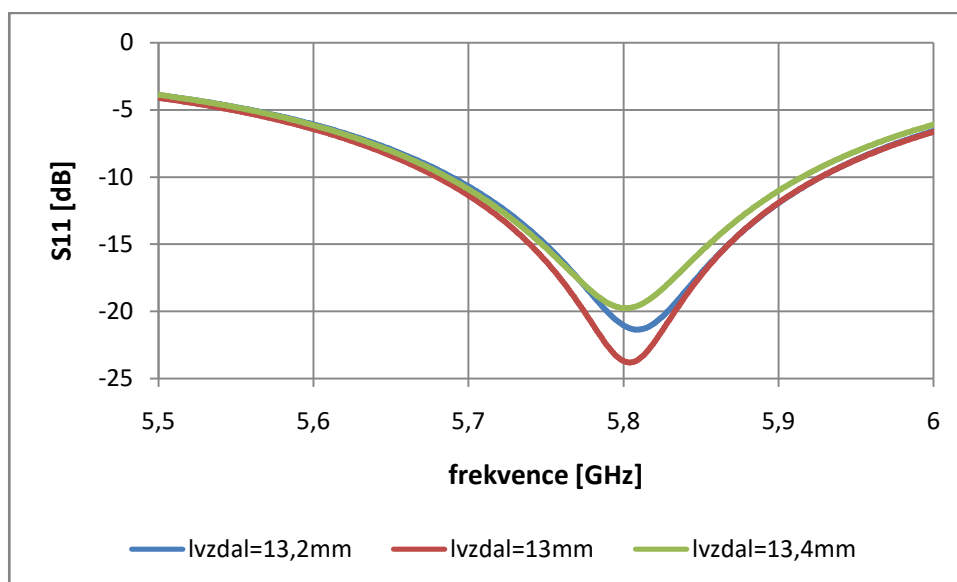
Obrázek 4.14 Vyrobená anténa na 24,125 GHz

## 5 PARAMETRICKÁ ANALÝZA

V předposlední kapitole jsou zobrazeny výsledky parametrické analýzy, v kterých se postupně měnily rozměry navržených antén. Analýzy byly provedeny pro obě navrhované antény. Zkoumaným parametrem byly hodnoty činitele odrazu na vstupu antény a v jednom případě zisk antény a její směrová charakteristika.

### 5.1 Změna vzdálenosti štěrbin od konce vlnovodu

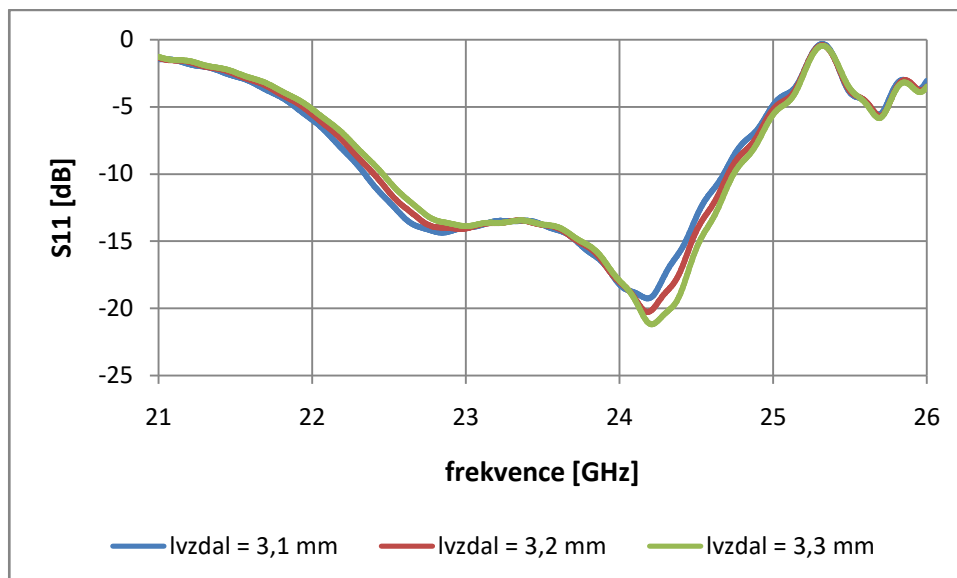
Tato část zkoumá vliv štěrbin umístěné ve třech různých vzdálenostech  $l_{\text{vzdal}}$  od zkratovaného konce vlnovodu u obou navrhovaných antén. Výsledky simulace pro anténu pracující v pásmu 5,8 GHz jsou zobrazeny na obr. 5.1. a pro anténu pracující v pásmu 24,125 GHz na obr. 5.2.



Obrázek 5.1 Změna vzdálenosti štěrbin od konce vlnovodu - analýza S11 5,8 GHz

Z obr. 5.1 lze pozorovat, že střed činitele odrazu na vstupu antény se posunul od 10 MHz k nižším frekvencím a v případě posunutí štěrbin blíže ke zkratu vlnovodu došlo ke zlepšení impedančního přizpůsobení a zvětšení šířky impedančně přizpůsobeného pásma.

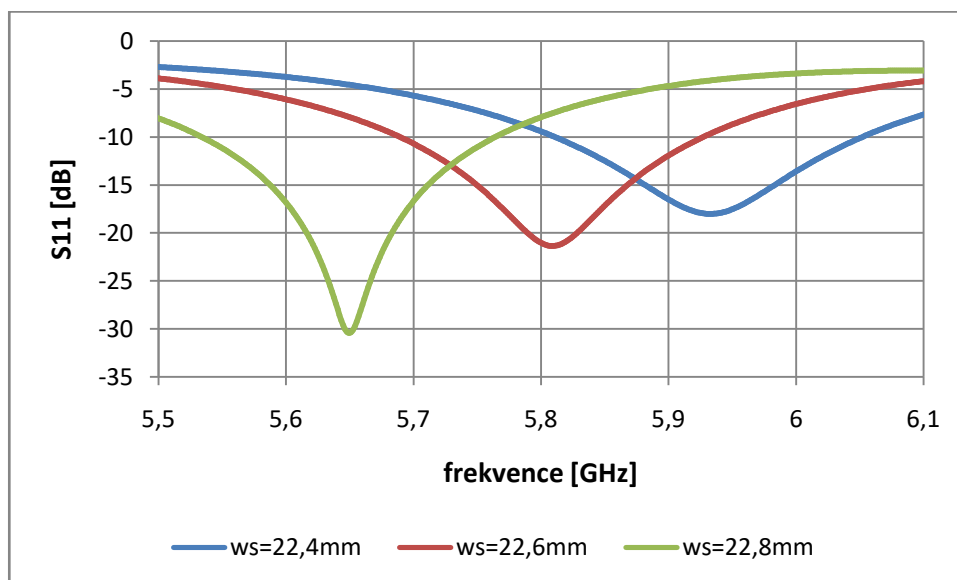
Na obr. 5.2 je zobrazena frekvenční závislost činitele odrazu na vstupu antény pracující v pásmu 24,125 GHz a je možné vidět s rostoucí vzdáleností  $l_{\text{vzdal}}$  o 0,1 mm posunutí rezonanční frekvence o 20 MHz k vyšším frekvencím. Šířka impedančně přizpůsobeného pásma zůstala pro všechny tři vzdálenost přibližně stejná.



Obrázek 5.2 Změna vzdálenost šterbiny od konce vlnovodu - analýza S11 24,125 GHz

## 5.2 Změna vnitřního průměru šterbiny

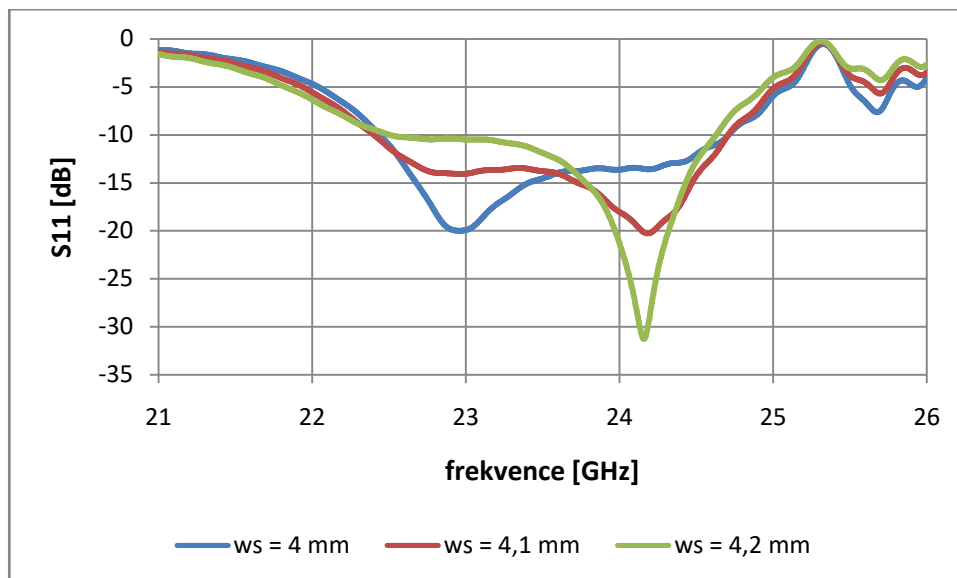
Druhý parametr, který je zkoumán, je vliv velikosti vnitřního průměru šterbiny antény  $w_s$  (obr. 3.8 a obr. 3.9). Parametrická simulace byla opět provedena pro obě navrhované antény pracující v pásmech 5,8 GHz (obr. 5.3) a 24,125 GHz (obr. 5.4).



Obrázek 5.3 Změna vnitřního průměru šterbiny - analýza S11 5,8 GHz

Změnou vnitřního průměru šterbiny dochází k nejvýraznějšímu ovlivnění rezonanční frekvence činitele odrazu na vstupu antény. V případě změny vnitřního průměru šterbiny o 0,2 mm dochází k posunutí rezonanční frekvence přibližně o 150 MHz k vyšším případně nižším frekvencím. Šířka pásma zůstává přibližně stejná (obr. 5.3).

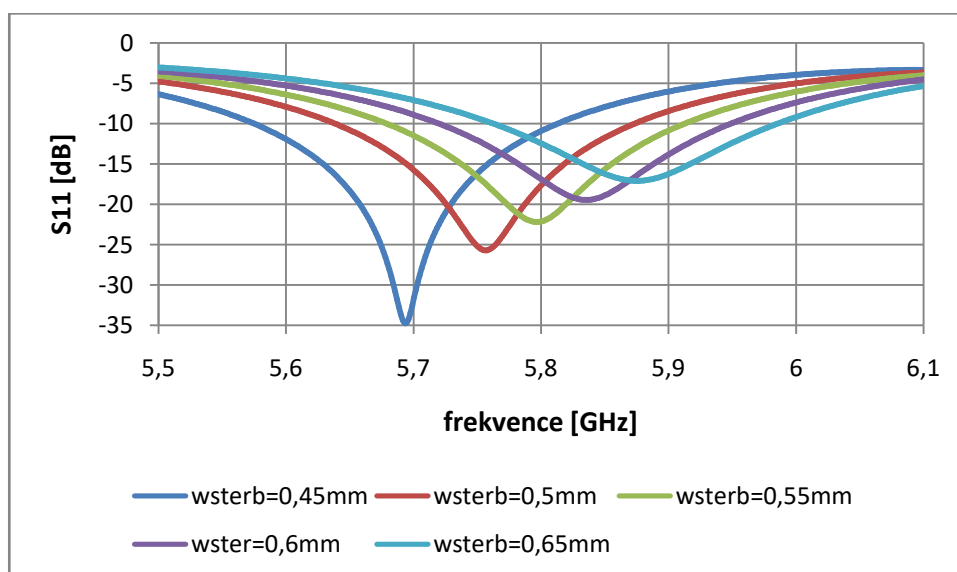
Z obr. 5.4 je vidět, že je anténa velmi citlivá změnou rozměru  $w_s$  na vyladění na požadovanou pracovní frekvenci 24,125 GHz. Změnou vnitřního průměru šterbiny  $w_s = 4$  mm dojde k posunutí rezonanční frekvence o 1,2 GHz. Šířka přizpůsobeného pásma je přibližně 2,3 GHz pro průměr šterbiny  $w_s = 4$  mm a  $w_s = 4,1$  mm.



Obrázek 5.4 Změna vnitřního průměru šterbiny - analýza S11 24,125 GHz

### 5.3 Změna šířky šterbiny

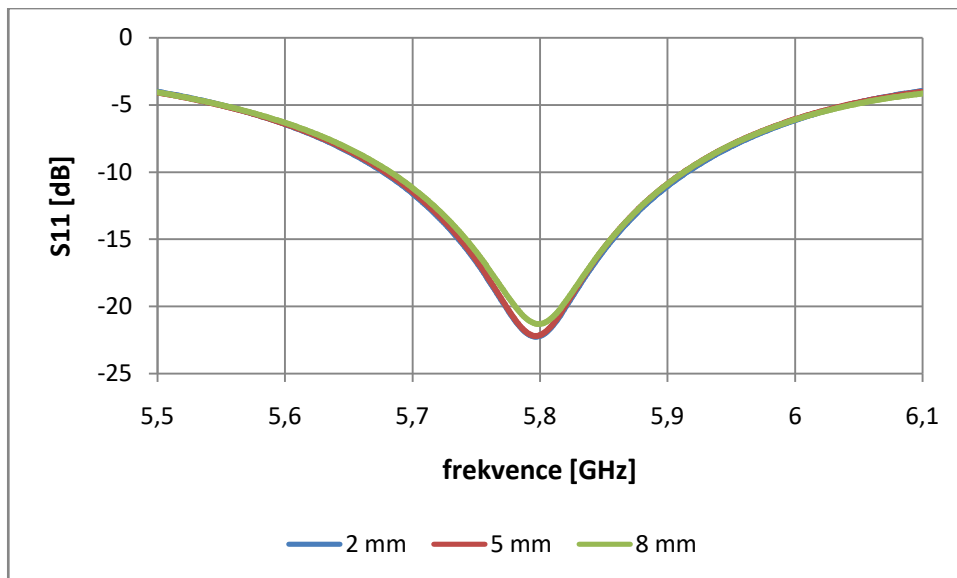
Další zkoumaný parametr je změna šířky šterbiny  $w_{sterb}$ . Tento rozměr byl zkoumán pouze u antény pracující v pásmu 5,8 GHz. Změnou tohoto rozměru lze pozorovat posunutí posun rezonanční frekvence k vyšším popř. k nižším frekvencím (obr. 5.5). Šířka impedančně přizpůsobeného pásma se zvětšující se šířkou šterbiny mírně zmenšuje.



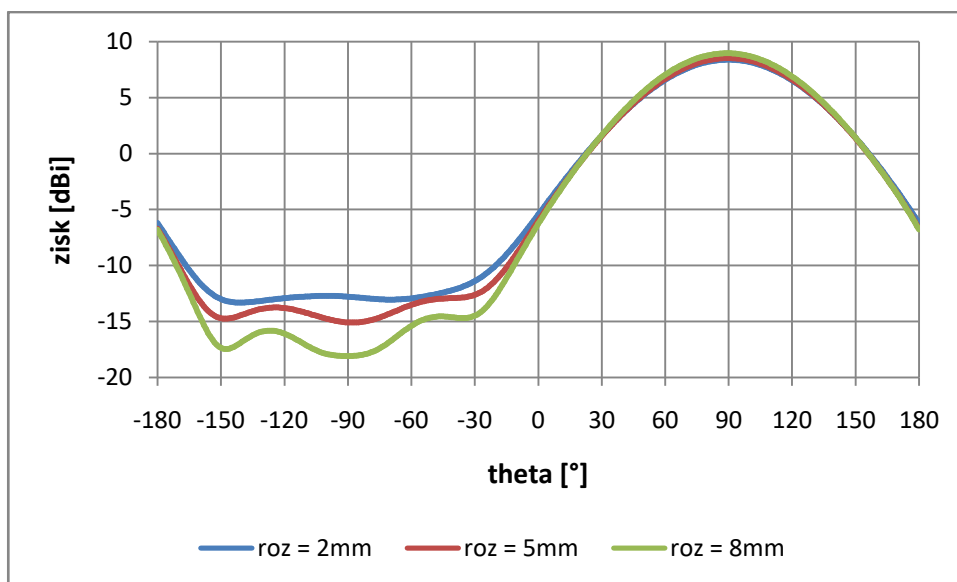
Obrázek 5.5 Změna šířky šterbiny - analýza S11

## 5.4 Změna velikosti zemní plochy

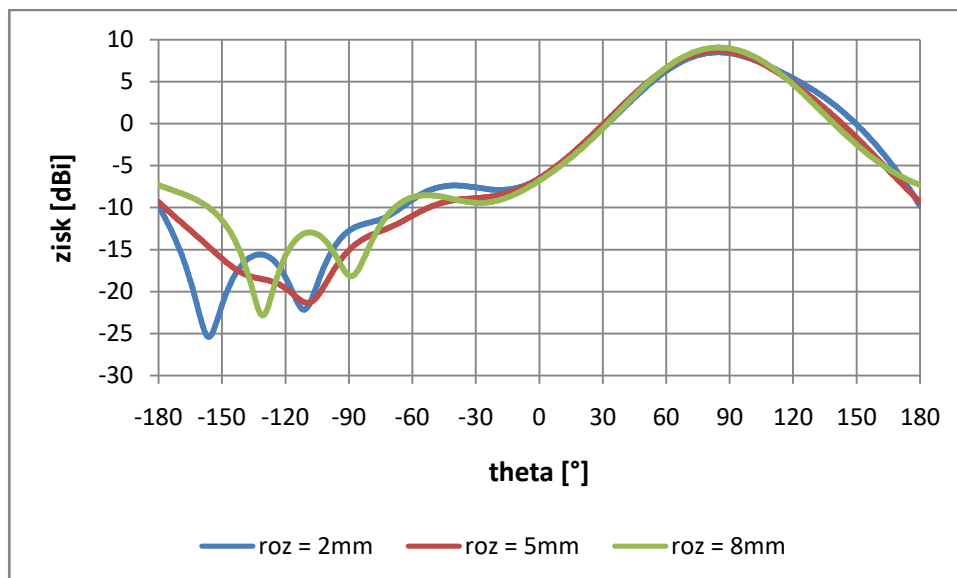
Tento parametr byl zkoumán u antény pracující v pásmu 5,8 GHz. Změnou velikosti zemní plochy  $w_{\text{prod}}$  nedochází k posunu středu činitele odrazu na vstupu antény (obr. 5.6). Ze směrových charakteristik (obr. 5.7 a obr. 5.8) lze pozorovat s rostoucím rozměrem zemní plochy mírně vyšší zisk antény a potlačení vyzařování v rovině H (obr. 5.7) v oblasti theta  $-160^\circ$  -  $-10^\circ$ .



Obrázek 5.6 Změna velikosti zemní plochy - analýza  $S_{11}$



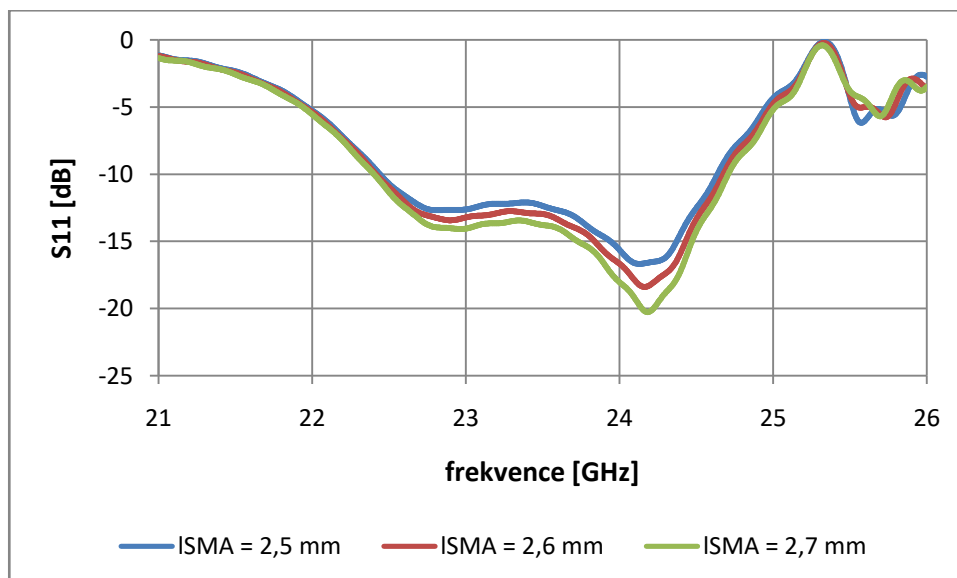
Obrázek 5.7 Změna velikosti zemní plochy - analýza rovina H



Obrázek 5.8 Změna velikosti zemní plochy - analýza rovina E

## 5.5 Změna vzdálenosti umístění SMA konektoru

Poslední zkoumaným parametrem byla vzdálenost  $l_{SMA}$  napájecího SMA konektoru od konce vlnovodu. Simulace byla provedena u antény pracující v pásmu 24,125 GHz. Zkrácení vzdálenosti SMA konektoru od konce vlnovodu dochází k horšímu impedančnímu přizpůsobení (obr. 5.9).



Obrázek 5.9 Změna vzdálenosti umístění SMA konektoru



## 6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh šterbinových antén na principu vlnovodu integrovaného do textilu (TIW).

V úvodní části je popsána struktura a vlastnosti vlnovodu SIW, dále práce krátce popisuje princip šterbinové antény. V třetí a čtvrté kapitole je popsán návrh šterbinových antén a srovnání naměřených výsledků s výsledky simulace. Na závěr je vytvořena parametrická analýza, kde je zobrazen vliv změn rozměrů antén.

V programu CST Microwave Studio byl ověřen funkční koncept antény podle [8]. Z tohoto konceptu jsem vycházel pro návrh šterbinové antény pro ISM pásmo 5,8 GHz. Po domluvě s vedoucím práce byl zvolen přechod GCPW - TIW místo přechodu mikropáskového vedení - TIW z důvodu menších vyzařovacích ztrát. První model antény byl vyroben pomocí měděné folie a druhý model sítotiskem. Kvůli dodání jiné tloušťky substrátu než původně uvažované došlo u prvního modelu k posunu rezonanční frekvence činitele odrazu na vstupu této antény a to na kmitočet 5,46 GHz, což je o 10 MHz posunuto k nižším frekvencím oproti výsledku simulace. Změřená směrová charakteristika je v rovině H téměř identická simulované charakteristice a v rovině E je hlavní lalok mírně posunut, což je nejspíš způsobeno SMA konektorem. Zisk této antény byl změřen 8,08 dBi. Při měření antény vyrobené sítotiskem došlo ke zjištění nedodržení rozměrů antény, což bylo způsobené výrobní technologií. Z tohoto důvodu nebyly změřeny směrové charakteristiky a zisk antény.

Další částí bakalářské práce byl návrh šterbinové antény pracující pro ISM pásmo 24,125 GHz. Bylo vycházeno z již vytvořené antény. Stěžejním bodem této části byl přechod SMA konektoru - šterbinová anténa. Původně navržený přechod SMA - GCPW vykazoval na této frekvenci podstatné parazitní vyzařování, a proto byl zvolen přechod pomocí koaxiální sondy, který toto vyzařování eliminuje. Anténa byla vyrobena pomocí měděné folie. Nejspíš nepřesným umístěním SMA konektoru došlo k posunu rezonanční frekvence z původních 24,125 GHz na 21,9 GHz. Zisk této antény dosahuje hodnoty 7,37 dBi. Malé odchylky směrových charakteristik jsou způsobené nepřesností výroby, jelikož stěny vlnovodu všech vyrobených antén byly vyšívány ručně.

# LITERATURA

- [1] RAIDA, Zbyněk. *Vlnovody* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/BEVA\\_07.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva/lecture/BEVA_07.pdf)
- [2] DE, Ratul, Brij Bhushan CHOWDHURY a Manik BHOWMIK. A novel design of dual frequency SIW slot antenna. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. IEEE, 2016, , 445-448. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566736. ISBN 978-1-4673-9197-9. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7566736/>
- [3] LÁČIK, Jaroslav. Vlnovod integrovaný do substrátu, obvody na bázi vlnovodu integrovaného do substrátu. Brno, 2016. Přednáška Mikrovlnná technika. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] HANUS, Stanislav a Jiří SVAČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky* [online]. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002 [cit. 2017-05-24]. ISBN 80-214-2222-X.
- [5] Slot Antennas. BEVELACQUA, Pete. The Antenna Theory Website [online]. 2010 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/slot.php>
- [6] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005. ISBN 978-0471667827.
- [7] SPUREK, Jan, Jan VELIM, Miroslav CUPAL, Zbynek RAIDA, Jan PRASEK a Jaromir HUBALEK. Slot loop antennas printed on 3D textile substrate. *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)* [online]. IEEE, 2016, , 1-3 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492085. ISBN 978-1-5090-2214-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7492085/>
- [8] LÁČIK, Jaroslav, Tomáš MIKULÁŠEK, Zbyněk RAIDA a Tomáš URBANEC. SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE MONOPOLAR RING-SLOTANTENNA. Brno, 2013. Brno University of Technology.
- [9] ŠPŮREK, Jan. *Textilní štěrbinová anténa* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=125042](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=125042). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Zbyněk Raida.
- [10] DATASHEET. RADIAL R125.441.000: RF / Koaxiální konektor, RADIAL. [cit. 24.5.2017]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/c/konektory/rf-koaxialni-konektory-prislusenstvi/rf-konektory>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TIW	Textile Integrated Waveguide, vlnovod integrovaný do textilu
SIW	Substrate Integrated Waveguide, vlnovod integrovaný do substrátu
(G)CPW	(Grounded) Coplanar Waveguide, (zemněný) koplanární vlnovod
$a$	Šířka vlnovodu
$b$	Výška vlnovodu
$m,n$	Vidová čísla
$f_m$	Mezní frekvence
$TE_{mn}$	Vid transversálně elektrické vlny
$\lambda_g$	Délka vlny ve vlnovodu
$f_{prac}$	Pracovní frekvence
$f_{krit}$	Mezní frekvence vidu $TE_{10}$
$S_{11}$	Činitel odrazu
$S_{21}$	Činitel přenosu
PSV	Poměr stojatých vln
$h$	Výška substrátu
$s$	Vzdálenost dvou prokůvů
$d$	Průměr prokovu
$w$	Šířka pásku GCPW
$g$	Šířka štěrbiny GCPW
$w_{ef}$	šířka ekvivalentního obdélníkového vlnovodu
$\epsilon_r$	relativní permitivita
$l_{vzdal}$	vzdálenost štěrbiny od konce vlnovodu
$w_s$	vnitřní průměr štěrbiny
$w_{sterb}$	šířka štěrbiny
$w_{prod}$	šířka rozšíření zemní plochy
$l_{SMA}$	vzdálenost umístění SMA konektoru od konce vlnovodu
$w_{mez}$	šířka štěrbiny GCPW
$l_{mez}$	délka štěrbiny GCPW
$l$	délka vlnovodu
$l_{pahyl}$	délka pahýlu